

# COMSOL NEWS

マルチフィジックス  
シミュレーションマガジン



## 水素で自動車 を動かす

シミュレーション主導のジ  
ェネラティブデザインがト  
ヨタの燃料電池研究開発を  
加速

PAGE 10



発展途上国では、シミュレーションによって収穫物の保存期間データが農家や貿易業者の手に渡ります。

PAGE 6

## シミュレーションで全体像を把握する

それが山の風景であれ、ジャガーの顔を間近で見たものであれ、パズルのピースはシームレスにつながり、大きな絵を浮かび上がらせませす。パズルのピースのように、設計やプロセスのすべての構成要素は、それぞれが適切に機能し、うまく連動しなければなりません。日々、世界中のエンジニア、科学者、研究者が、マルチフィジックスモデリングとシミュレーションを使用して、完全なシステムを構成する個々のピースを理解し、最適化しています。今年の COMSOL ニュースでは、彼らの感動的なストーリーをいくつかご紹介します。

10ページでは、北米トヨタ研究所のチームが、流れ場のマイクロ流路プレートを最適化するためのシミュレーション主導の方法論を考案し、最終的に水素自動車の開発を促進したことを紹介しています。また、Zeugin Bauberatungen 社が、吸音カーテンと発泡パネルが、オープンプランのオフィス設計において、どのように騒音による気晴らしを減らすのに役立つかを分析している話も掲載されています。

さらに、大規模プロセスの特定の側面を分析するためのシミュレーションアプリの作成と展開に関する記事も掲載しています。ある例では、生鮮食品の賞味期限を予測するためにシミュレーションアプリを使用し、発展途上国における冷蔵食品貯蔵の利用を改善していることが紹介されています。また、建設チームが各プロジェクトを通じて十分な情報に基づいた意思決定を行い、可能な限り最高の結果を出しながら過剰な出費を避けるのを支援するアプリを取り上げた記事も紹介しています。

今年は、可視化、3Dモーターモデリング、MEMS デバイスなどのトピックに関するヒントやインスピレーションを提供する記事もいくつかご紹介します。分野や用途に関係なく、それぞれの部品が全体像を念頭に置いて最適化されることで、優れたデザインが生まれます。

Rachel Keatley  
COMSOL, Inc.

---

### COMSOL コミュニティと交流する

**BLOG** [comsol.com/blogs](https://comsol.com/blogs)

**FORUM** [comsol.com/forum](https://comsol.com/forum)

**LinkedIn™** [linkedin.com/company/comsol-inc-](https://linkedin.com/company/comsol-inc-)

**Facebook®** [facebook.com/multiphysics](https://facebook.com/multiphysics)

**X (旧 TWITTER®)** [twitter.com/COMSOL\\_Inc](https://twitter.com/COMSOL_Inc)

---

COMSOL ニュースに関するご意見、ご感想をお待ちしております。info@comsol.com までご連絡ください。これらのストーリーと関連リソース (参考文献やモデルを含む) をオンラインでご覧になるには、comsol.com/stories をご覧ください。

© 2023 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, COMSOL Server および COMSOL Compiler は、COMSOL AB の登録商標または商標です。COMSOL AB およびその子会社ならびに製品は、これらの商標権者と提携、承認、後援、またはサポート関係にありません。商標所有者のリストについては、[www.comsol.com/trademarks](https://www.comsol.com/trademarks) を参照してください。

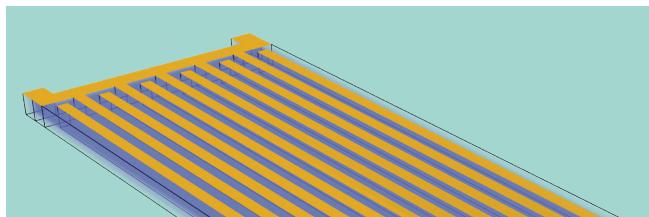
LinkedIn は、米国およびその他の国における LinkedIn Corporation およびその関連会社の商標です。Facebook は Facebook, Inc. の登録商標です。TWITTER は X Corp. の登録商標です。

## 目次



### 実際のモデリング

- 4 モデルの可視化のヒント  
COMSOL, Massachusetts, USA



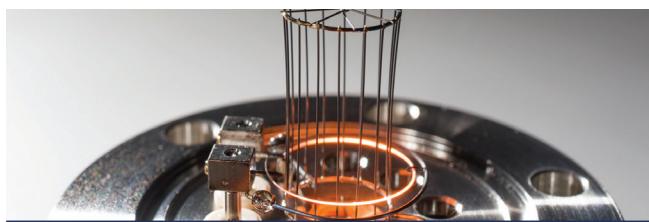
### マルチフィジックスイノベーション

- 14 RF MEMS 共振器, 通信システムの構成要素  
COMSOL, Massachusetts, USA



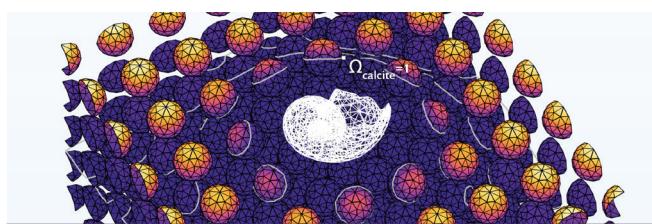
### シミュレーションの民主化

- 6 シミュレーションアプリによる果物の鮮度予測  
Empa, Switzerland
- 16 マルチフィジックスシミュレーションを建設現場に導入  
Heidelberg Materials, Norway and Sweden



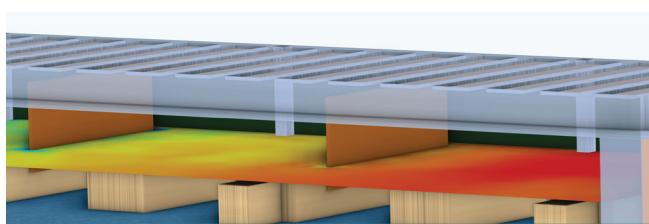
### シミュレーションベースの製品開発

- 20 シミュレーションによる電離真空計の性能向上  
INFICON, Liechtenstein
- 33 3Dへのシフト: 自動車の電動化に向けたモーターモデリング  
COMSOL, Sweden



### リサーチスポットライト

- 10 ジェネラティブデザインにより水素燃料電池開発が本格化  
Toyota Research Institute of North America, Michigan, USA
- 26 朽ちた貝殻が海のアルカリ性を保つ仕組み  
Utrecht University, Netherlands



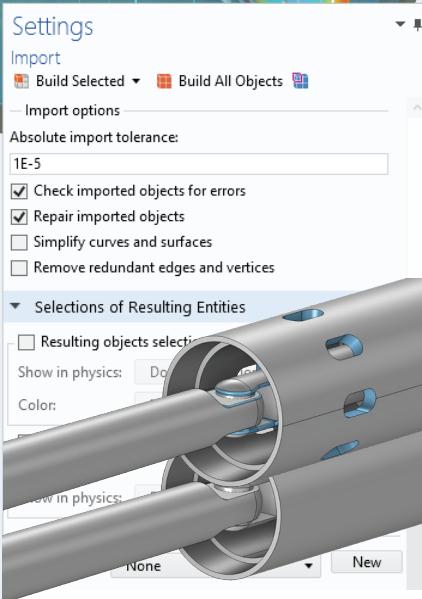
### 設計の最適化

- 23 小型衛星の熱モデリング  
COMSOL, Massachusetts, USA
- 30 オープンプランオフィスにおける音とスタイルの調和  
Zeugin Bauberatungen, Switzerland

# モデルの可視化のヒント

DIXITA PATEL 著

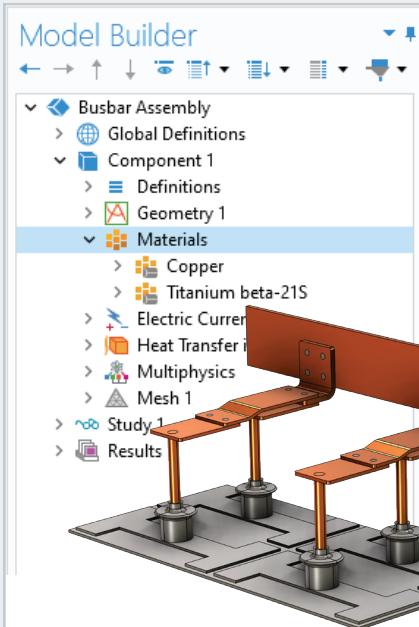
モデルは実世界の対応物を表しています。これは、寸法、全体的な形状、物理学的な正確さを厳密に確認することと解釈できます。あるいは、もう一歩踏み込んで、色、テクスチャ、ライティングを慎重に選択することで、モデルを可能な限りリアルに見せることもできます。ここで紹介するテクニックは、有益な結果を生み出し、モデルの視覚的な魅力を高めるのに役立ちます。



## ジオメトリ

最初から形状と寸法を正確に把握します。ジオメトリを最初から構築するか、インターフェース製品を使用して3D CAD ファイルをインポートします。

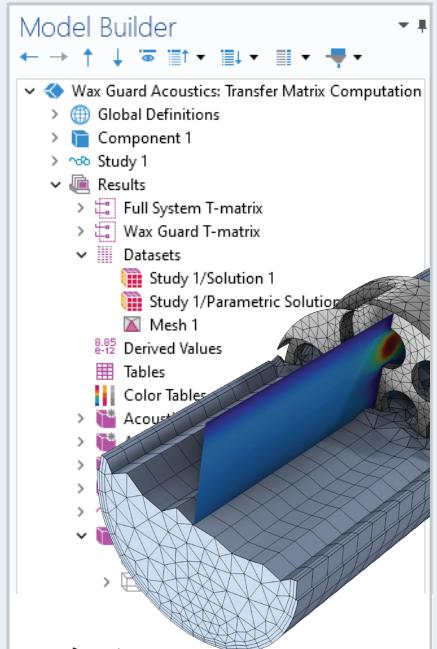
色付きの選択範囲をドメインと境界に割り当てることで、モデルを解釈しやすくします。欠陥のあるジオメトリを修復したり、詳細すぎるジオメトリを削除したり、ジオメトリエンティティを削除してモデルを解析できるようにするためのツールを見つけます。



## 材料

色と質感を現実に合わせます。材料をジオメトリに割り当てると、モデルコンポーネントを材料の実際の色でレンダリングできます。[材料のカラーとテクスチャを表示] オプションを選択すると、割り当てられた材料に忠実なレンダリングを可視化できます。

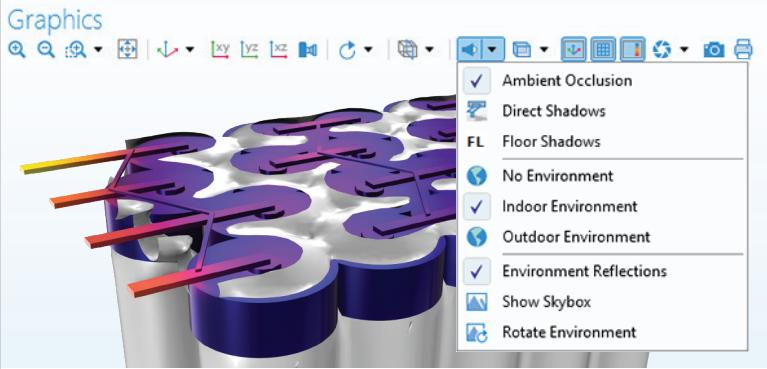
現実的な可視化を作成するために、材料の外観機能を使用して、シミュレーション結果を示すプロットとジオメトリの一部を混合することもできます。



## メッシュ

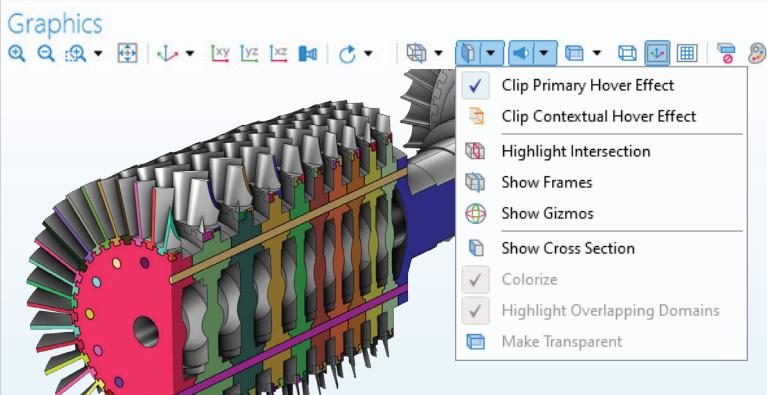
適切なメッシュを自動または手動で作成します。[結果] ノードの下にあるすべてのプロットは、可視化と結果解析のための解を含むデータセットを参照します。メッシュプロットでメッシュデータセットタイプを使用すると、解を計算せずにメッシュ関連量を可視化することができます。

これは、2Dまたは3Dのメッシュ品質、メッシュサイズを表示したり、三角形、四面体、ピラミッドなどの異なるメッシュ要素タイプを表示したりするのに便利です。



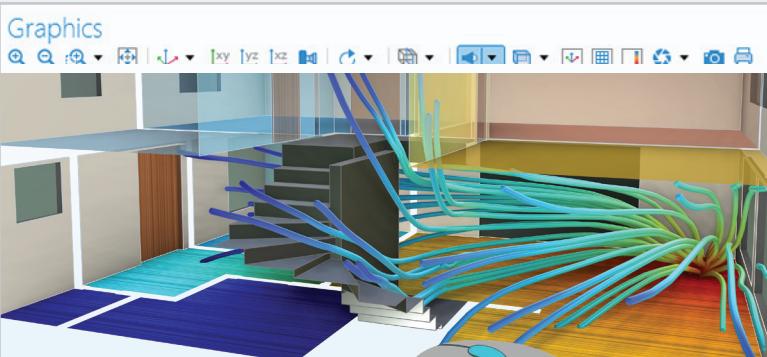
## シーン照明

リアリズムを高めます。アンビエントオクルージョン、ダイレクトシャドウ、フロアシャドウ機能により、リアルなライティングを追加し、オブジェクト間の影で奥行き感を向上させることができます。屋内環境と屋外環境オプションは、反射を追加します。



## クリッププレーン

複雑な形状の内部を確認します。インタラクティブなクリッピング機能により、複雑な3Dジオメトリ内にあるエッジ、境界、領域を選択することができます。クリップ平面、ボックス、円柱、球を追加して、どの部分を表示するか選択できます。



## マウスドリー

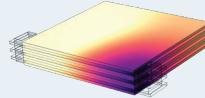
視点を変えてみましょう。このショートカットを使用して、シーン内のオブジェクトを通してカメラを移動し、ジオメトリの目を引く可視化を作成します。



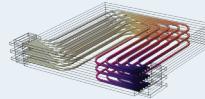
## フォローしてください

ヒントを実践する準備はできましたか? COMSOL Multiphysics® でこれらの例題モデルを開いてください! COMSOL Multiphysics® の複数の機能を組み合わせることで、驚くような可視化でシミュレーション結果を向上させることができます。

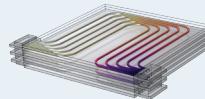
Application ID: 10368



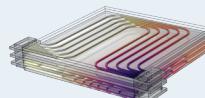
デフォルトの温度プロット。



流路の境界を選択し、材料の外観を追加します。



バッテリーパックの境界を選択し、材料の外観と透明度を追加します。



温度を表す等温線を追加します。



[データセットエッジのプロット]の選択を解除し、アンビエントオクルージョンライティングをオンにします。

Application ID: 18837



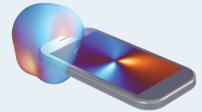
遠方場利得を示すデフォルトの放射パターンプロット。



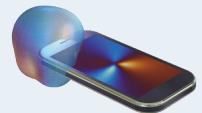
透明度と白く細いグリッド線を追加します。



携帯電話の外側の境界を選択し、材料の外観と色を追加します。



スクリーン境界を選択し、遠方場利得を表す表面プロットを追加します。



屋内環境照明をオンにします。

Empa, Switzerland

# シミュレーションアプリによる果物の鮮度予測

スイスの研究機関 Empa は、新鮮な果物や野菜の賞味期限を予測するために、農家や貿易業者が使用するスマートフォンアプリに結果を入力するモデルを構築し、シミュレーションアプリケーションを作成しました。この研究は、発展途上国における冷蔵食品貯蔵の利用を改善することを目的とする多国籍連合を支援するものです。

RACHEL KEATLEY 著

生鮮食品の収穫後の流通は、世界のフードサプライチェーンの中でも特に脆弱な部分です。毎年、世界中で人間が消費するために生産される食料の約3分の1が失われたり、無駄になったりしています。特にインドのような発展途上国では、生産された食品のわずか6%しか

冷蔵された“コールドチェーン”に入ることができず、腐敗しやすい状態になっています。現在、太陽光発電を利用した小型の冷蔵庫(図1)のような希少な冷蔵スペースは、すでにピークを過ぎた作物によって占有されている可能性があり、冷蔵庫へのアクセスを待っている間に

他の出荷物が腐敗してしまうこともあります。食品サプライチェーン関係者による多国籍コンソーシアムの一員として、スイス連邦材料科学技術研究所 (Empa) とバーゼル持続可能エネルギー機関 (BASE) は、こうした問題を軽減するために Coldtivate を開発しました。Coldtivate は、さまざまな種類の果物の冷却腐敗プロセスをリアルタイムでユーザーに知らせるモバイルアプリです。2022年後半にインドの3地域、2023年にナイジェリアの冷蔵倉庫業者に展開され、マルチフィジックスシミュレーションを搭載しています。このアプリを使用する農家は、実際に基礎となるマルチフィジックスモデルを見たり、シミュレーションアプリと直接やり取りしたりすることはありません。彼らは、Coldtivate モバイルアプリを通じて、自分たちが実行可能な形で結果を受け取るのです。

## 食品保存を最適化するためのシミュレーションに基づく予測

青果物の鮮度に関するデータ駆動型の予測を提供します。これらの予測は、Empa 社が COMSOL Multiphysics® ソフトウェアと内蔵のアプリケーションビルダーを使用して作成したシミュレーションアプリ(図2) から中継されます。



図1 収穫後の作物を保管するための冷蔵庫。

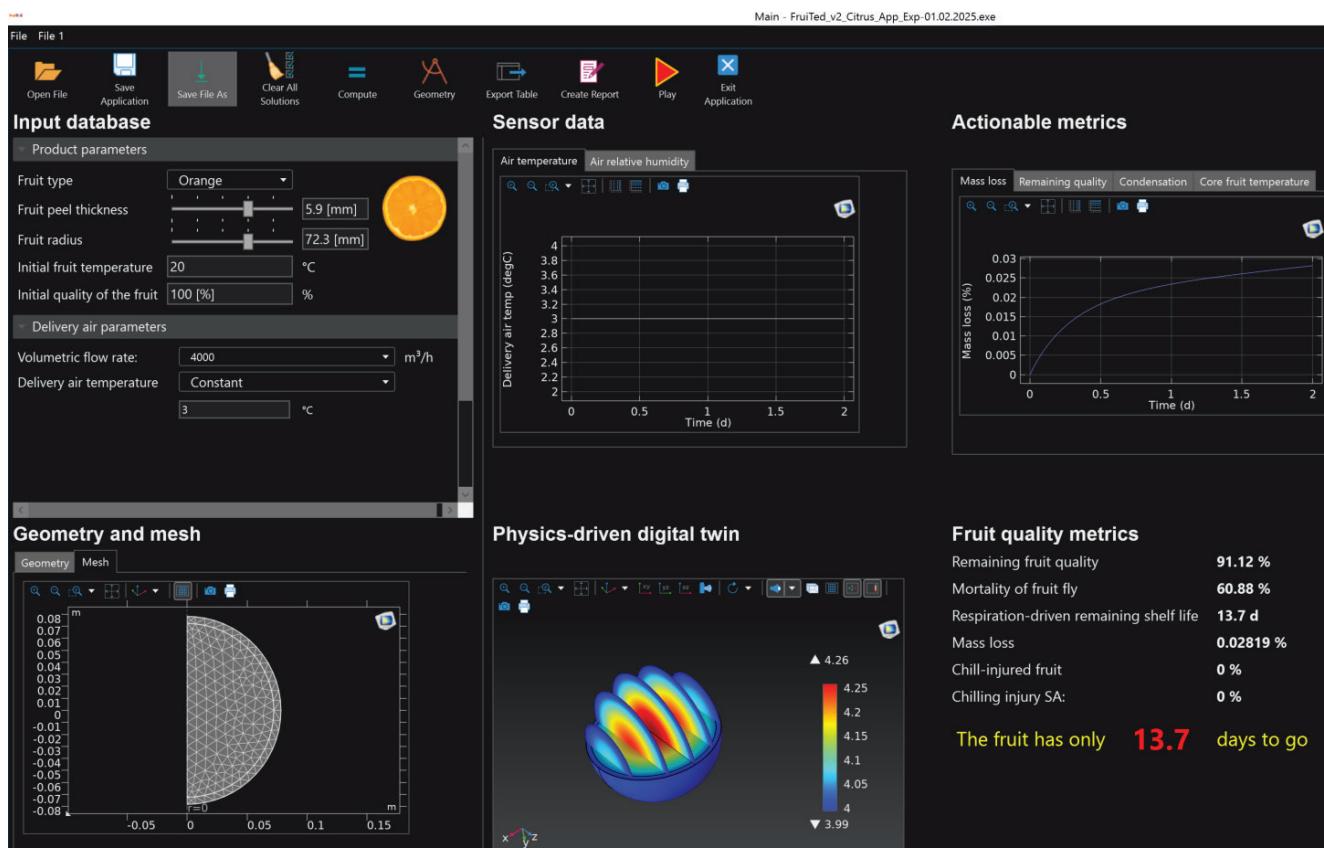


図2 Empa の COMSOL アプリはデスクトップコンピューター上で動作し、青果物の鮮度に関連する多くの指標を生成します。

シミュレーションアプリは、既存の COMSOL Multiphysics モデルから作成される使いやすいインターフェースで、アプリの設計者が表示する入出力を決定します。シミュレーションアプリはそのまますぐに使用できますが、Empa 社と BASE 社は、主に農業従事者であるエンドユーザーにとって最も馴染みやすい方法でシミュレーションアプリのデータを中継したいと考えました。現代の農業ではモバイルアプリが広く使われているため、彼らはエンドユーザー向けのユーザーインターフェースとして Coldtivate を開発しました。

Empa のデータサイエンティストであり、Coldtivate プロジェクトの技術共同責任者である Joaquin Gajardo 氏は、「当社の COMSOL アプリは、モバイルアプリをホストするのと同じヘッドレスサーバー上で実行されます」と説明します。これにより、シミュレーションアプリとモバイルアプリの両方が相互に情報を中継できるようになります。「アプリケーションビルダーを使用して、(モバイルアプリの) 入力パラメーターの変更に基づいてシミュレーションの更新を自動化しました」と Gajardo 氏は述べています。これにより、Empa のマルチフィジックスモデルの機能と、専用のモバイルアプリの利便性が組み

合わされます。このような方法でシミュレーションアプリを使用するには、最初に COMSOL Compiler™ を使用してそれをスタンドアロンの実行可能ファイルにコンパイルしました。

「アプリケーションビルダーがなければ、デジタルツインをモバイルアプリに展開し、これらのマルチフィジックスシミュレーションとその結果を零細農家のような幅広い受益者に民主化することは不可能でした」と Empa の上級科学者シニアサイエンティストで、Wageningen University & Research の教授である Thijs Defraeye 氏は述べています。

### » シミュレーションアプリの背後にあるモデル

周囲温度は生鮮食品の保存期間に直接影響します。しかし、ほとんどの冷蔵倉庫には温度計が設置されていますが、温度計が提供するデータは、果物や野菜の保存期間を予測するには不十分です。

「冷蔵室からの単一の温度または湿度曲線では、農産物の予想寿命を予測することはできません」と Defraeye 氏は述べます。「各木箱の COMSOL モデルは、冷蔵室から実際の温度と湿度のデータを受信するため、残りの保存期間を頻繁に再計算できます。」このモ

デルは、Empa のシミュレーションアプリのベースとなっています。

さらに、特にその木箱が最近室内に持ち込まれたばかりの場合、保管スペースの一部にあるセンサーが、木箱の中に埋められたリンゴの表面の温度を必ずしも反映するとは限りません。

青果物の各出荷が、保管条件の変化によってどのような影響を受けるかをより詳細に把握するため現在 Empa は、COMSOL Multiphysics を使用して、様々な果物や野菜の出荷全体をモデル化するためにモデルを拡張しています (図 3)。「そのためには、多孔質媒体モデリングアプローチを使用して、センサーの測定値から実用的な指標を生成する必要があります」と Defraeye 氏は述べています。

### » アプリの動作

「新しい出荷物が冷蔵室に到着したとしましょう」と Gajardo 氏は提案します。「オペレーターは携帯電話で Coldtivate アプリを開き、農産物の種類、現在の温度、収穫からの日数、その他の関連値を入力します。すると、モバイルアプリがこの情報を含むテキストファイルを生成します。このテキストファイルの値が

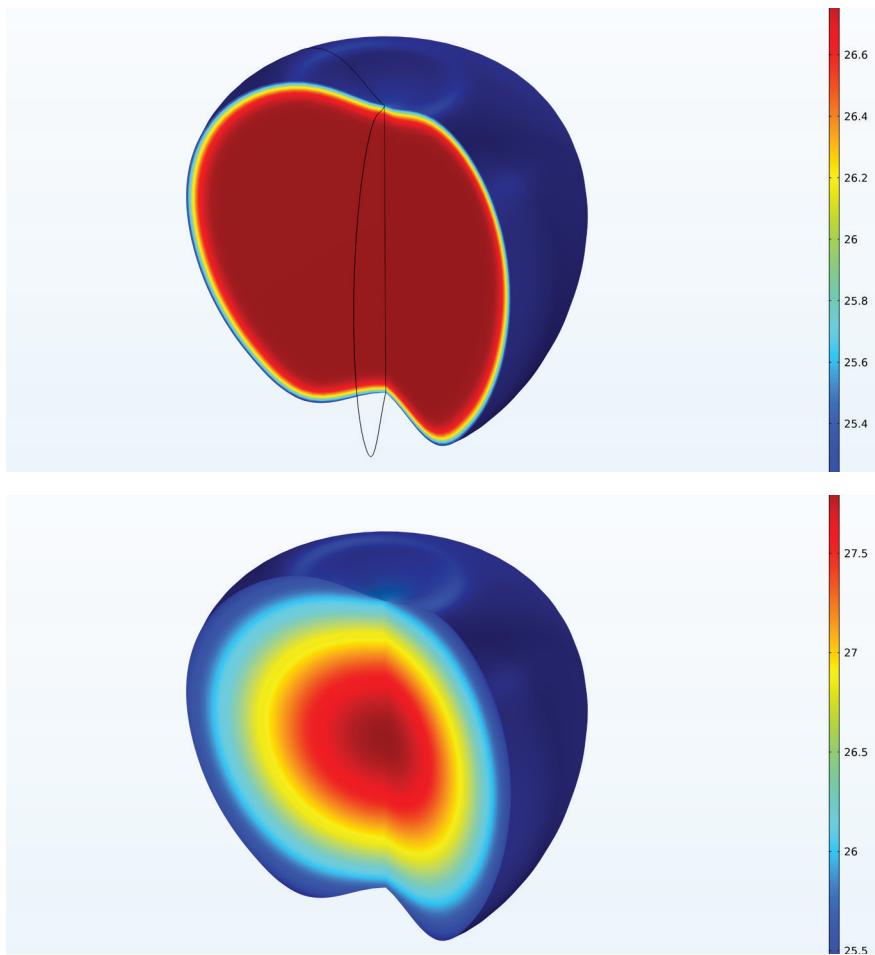


図3 EmpaによるリンゴのCOMSOLモデルの結果. 表面温度が時間の経過とともに内部の温度分布にどのような影響を及ぼすかを示しています。

COMSOL アプリの入力引数となり、COMSOL アプリが予想賞味期限を計算します。この計算結果は出力ファイルに書き出され、その後、モバイルアプリのユーザーインターフェースに残存品質と日数が表示されます。”

Coldtivate アプリに表示される値は6時間ごとに、最新の冷蔵室温度データに基づく最新の予測値で再計算されます(図4)。農家はモバイルアプリで木箱の賞味期限残量を直接確認できます。農家がスマートフォンを持っていない場合は、“倉庫のオペレーターが、農産物の冷蔵室での鮮度保持期間を通知することができます。”と Gajardo 氏は語ります。最終的に、この情報は農家が売れ残った農産物を売ったり、不必要に廃棄したりするのを防ぐのに役立つでしょう。

### » チームワークが信頼できるデータを生む

Defraeye 氏と Empa のチームは、データ収集とモデル化プロセスの構築に何年も費やしてきました。“2021年初頭、私たちはすでに(農

産物の鮮度を分析する) モデルを作っていました。が、実際のサプライチェーンではまだ展開されていませんでした。”と Defraeye 氏はいいます。非営利のグローバル開発組織からの問い合わせが、Coldtivate モバイルアプリ(図5)の作成につながる取り組みのきっかけとなったのです。

“農家が利用可能な資源をより有効に活用できるよう、革新的なビジネスモデルを開発するBASE社から連絡を受けました。そのアイデアは、有料ビジネスモデルと冷房へのアクセスを改善するインテリジェンスを組み合わせることでした。そのためには、支援したい人々と密接な関係を持つ他のパートナーが必要でした。”と Defraeye 氏は語ります。これらのパートナーには、インドの Bihar 州、Himachal Pradesh 州、Odisha 州の冷房会社やその他の関係者が含まれ、BASE と Empa は、Your Virtual Cold Chain Assistant (YourVCCA) と呼ばれるイニシアティブに参加しました。

“信頼が重要な要素です。”と Defraeye 氏はいいます。“シミュレーションによって、時間

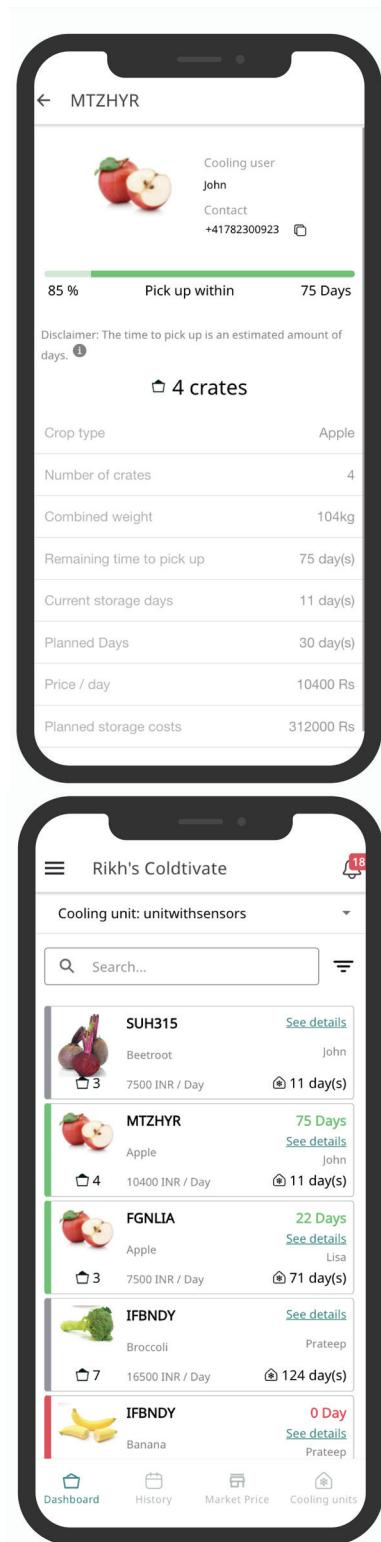


図4 Coldtivate アプリは、農家が保管中の木箱について、残りの品質や予想される賞味期限などの関連情報を表示するものです。

が経つにつれて農産物に何が起るかを覗き見ることができ、スマートフォンのアプリによって、冷蔵室のマネージャーや農家など、その情報を利用できる人々の手に渡ります。目標は、大きな違いを生み出すことができる販売時点での透明性を高めることです。農家や冷蔵室のオペレーターが予報を信頼できれば、お互いの信頼にもつながります。”

## ▶ 現場でのCOLDTIVATE

2022年8月、Coldtivate アプリは、施設内の農産物を追跡するためのアプリの使用法に関するトレーニングとともに、選ばれたコールドルーム運営者にリリースされました(図6)。現在までに、このシミュレーションアプリは17の冷蔵室で試験的に導入され、300以上の農家が利用しています。これらの農家は、収入が20%増加し、収穫後の食品ロスが20%減少したと報告しています。Empaとそのパートナーは現在、Coldtivate のインパクト拡大に取り組んでいます。

このアプリの将来の改良版では、市場価格の予測や、農産物の写真に基づく品質予測など、さらに関連した情報を提供する予定です。現在、BASEとEmpaはナイジェリアとフィリピンの組織と協力して、Coldtivate の利点を世界のより多くの地域で利用できるよう取り組んでいます。

世界的なポストハーベスト農作物の損失規模は大変なものですが、Coldtivate プロジェクトの背後にある連合は、進歩が手の届くところにあることを証明しています。“シミュレーションベースの予測ツールを利用することで、冷却へのアクセスが改善されることを目の当たりにしています。今必要なのは、段階的なパイプステップではなく、影響を拡大するための大胆な行動です。私たちは、テクノロジーをより多くの人々の手に届けることで、変化をもたらすことができるのです。”とDefraeye氏は語ります。◎

## 謝辞

Coldtivate の開発には、ロックフェラー財団および Mastercard Center for Inclusive Growth が支援する data.org Inclusive Growth and Recovery Challenge 助成金 Your Virtual Cold Chain Assistant、およびドイツ連邦経済協力開発省 (BMZ) が委託し、ドイツ国際協力庁 (GIZ) を代表して BASE および Empa が実施するプロジェクト Scaling up Your Virtual Cold Chain Assistant が一部資金を提供しています。プロジェクトチームは、主要なプロジェクトパートナーである Koel Fresh Private Ltd., Oorja Development Solutions India Private Ltd., ColdHubs Ltd. の各社に、賞味期限モデルのテストと微調整に貢献していただいたことに感謝します。

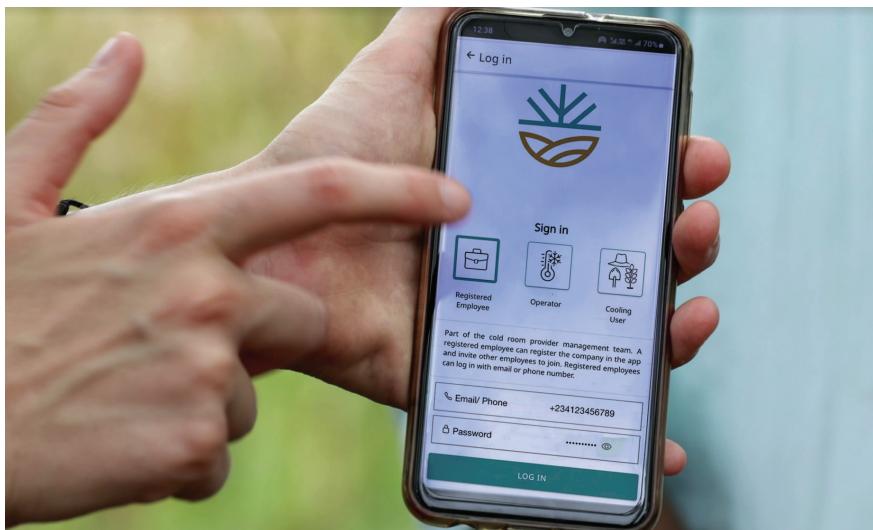


図5 ユーザーが手にするColdtivateスマートフォンアプリ。



図6 アプリ研修に参加するインドOdisha州の農家とコールドルーム運営者。

**“アプリケーションビルダーがなければ、デジタルツインをモバイルアプリに展開し、これらのマルチフィジックスシミュレーションとその結果を、零細農家のような、より多くの受益者に普及させることは不可能だったでしょう。”**

— THIJS DEFRAEYE, EMPAシニアサイエンティスト

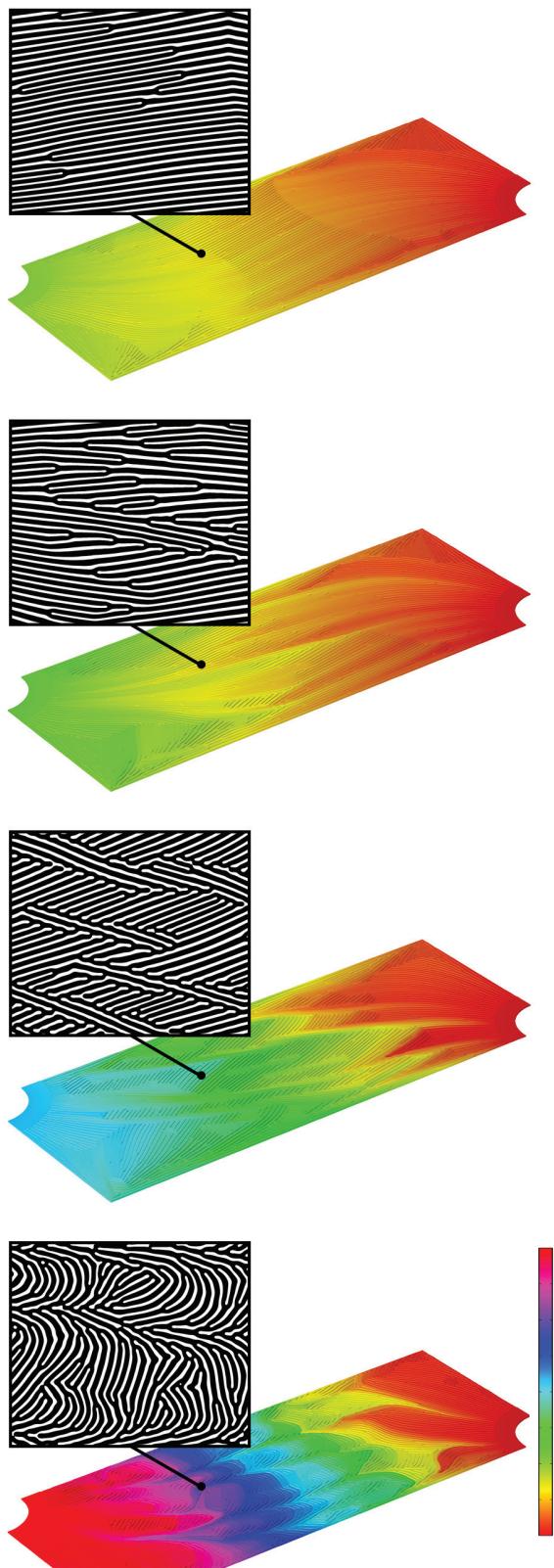


図1 TRINA チームが COMSOL Multiphysics® を用いて作成したモデルによるシミュレーション結果。4つの異なるマイクロ流路流れ場の設計による圧力分布を表示。

Toyota Research Institute of North America, Michigan, USA

# ジェネラティブデザインが水素燃料電池の開発を加速させる

トヨタは、電気自動車に代わるドライブトレインとして、水素酸素燃料電池の開発を進めています。北米トヨタ研究所 (TRINA) は、燃料電池流れ場プレートの研究開発プロセスを加速するためのシミュレーション主導の手法を開発しました。

ALAN PETRILLO 著

"すべてを電化する。" 化石燃料への依存を減らそうとする人々の間では、この言葉が叫びとなっています。ハイブリッドガス電気自動車 (HEV) や電気自動車 (BEV) が高速道路で見慣れた光景になっているように、私たちの周りでも電動化の必要性を実感することが多くあります。しかし、多くの自動車メーカーが HEV や BEV の生産を拡大する中、エネルギー貯蔵を主に電池に頼らない電気自動車の開発に専念している企業があります。それは、燃料電池の中で空気中の酸素と結合して電気を供給する水素を搭載した電気自動車です。この代替ルートを追求しているのがトヨタです。水素を燃料とする自動車の商業化には多くの障害がありますが、燃料電池を動力源とする車輪で世界を走らせることができるとしたら、それは世界最大の自動車メーカーかもしれません。

## シミュレーションが可能にするジェネラティブデザイン

北米トヨタ研究所 (TRINA) は、シミュレーション主導の生成的デザイン手法を開発し、水素酸素燃料電池のようなマイクロリアクター内の流体反応物の動きを制御する流れ場マイクロ流路プレートに応用しました。トヨタの燃料電池の研究開発の多くは非公開ですが、TRINA チームは、シミュレー

ションを活用した“逆設計”プロセスに関する論文を Chemical Engineering Journal に発表しました。このプロセスを流れ場プレートに適用した結果、4つの特徴的なマイクロ流路設計が得られました(図1)。

4つの設計にはそれぞれ特別な長所があり、いずれも主要な指標において既存のベンチマーク設計を上回っています。同様に重要なのは、これらの設計がプロセスの力を実証していることです。TRINA は、シミュレーションによって可能になるジェネラティブデザインがいかにイノベーションを加速させるかを示しました。TRINA の研究員である Yuqing Zhou 氏は、“私たちは、この逆アプローチが現在の設計手法に革命をもたらすと考えています。”と語ります。

### ▶▶ よりクリーンなパワートレインオプション

水素 - 酸素燃料電池は、自動車に電力を供給する珍しい方法のように思われるかもしれませんが、技術自体は新しいものではなく、その操作は魅力的なほど簡単です。図2は、一般的な燃料電池の基本的な動作を示しています。水素ガスがアノードを横切ると触媒に出会い、水素イオンと電子に分離されます。水素イオンが電解質

を通過してカソードに到達するのに、電子は燃料電池の外側の導体を通して移動します。この電流を利用して有用な仕事を行うことができます。

空気中の酸素ガスがカソードを横切ると、カソード表面で水素イオンと戻り電子に出会います。ここで酸素分子が分裂し、水素イオンと電子と結合して水になります。

### ▶▶ 流れ場プレートを通る反応物の経路

水素と酸素が流れ続ける限り、燃料電池は電流を発生し続けます。これらの不可欠なガスの分配を管理するのが、セルの流れ場プレートの仕事です。各プレートには、マイクロ流路構造と多孔質サプレイヤーの両方が含まれています。水素がアノード側プレートの流路を移動するとき、水素もサプレイヤーを通過してアノードに向かって押し出されます。一方、空気は燃料電池のカソード側にある流れ場プレートを通して流れます。空気と水はカソード側の多孔質材料層を通して交換され、プレートは余分な空気と水をセルスタックから排出します。図3は、カソード側のこの重要なプロセスを簡略化して拡大したものです。

TRINA チームは論文で、“流体

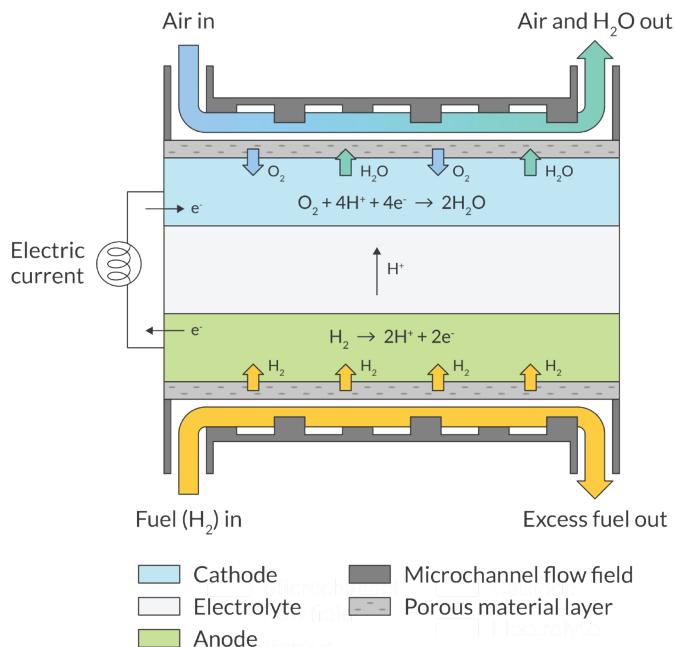


図2 一般的な燃料電池の設計。

の滞留時間または流体分布の均一性、および最適な熱伝達との関係は、化学反応を適切に制御するために最も重要な流れ構造の設計に直接関係している。”と説明しています。従って、燃料電池の流れ場プレート設計の2つの主な目的は、電極に十分な反応物を供給するために、プレートのマイクロ流路の流れ場を横切る流体の流れと多孔質材料層を通る流体の流れを最大化することです。

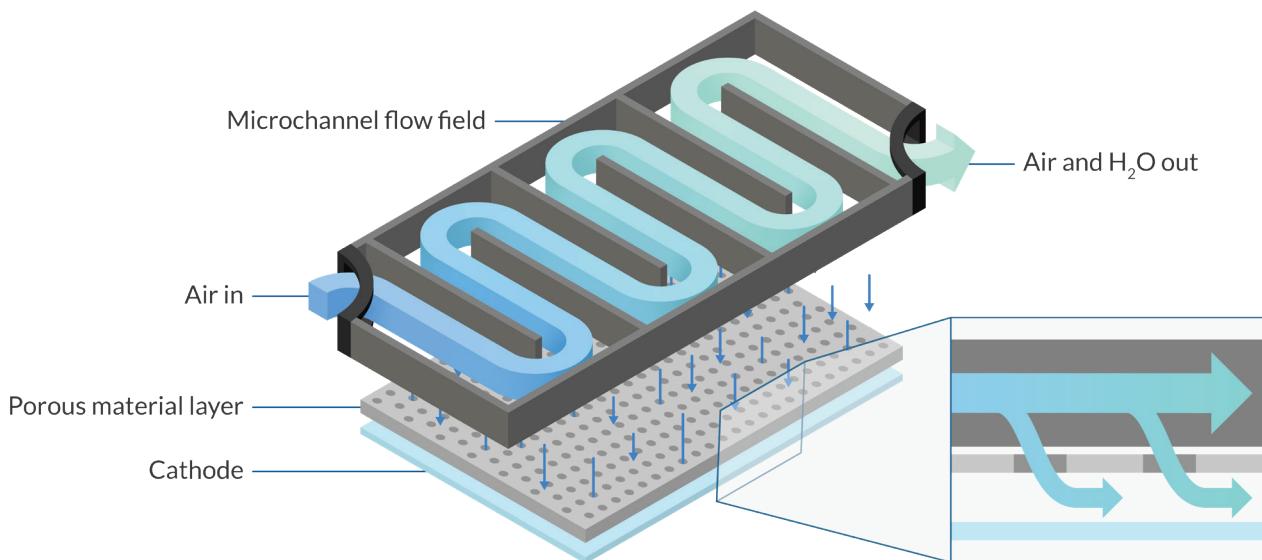


図3 マイクロ流路構造（濃い灰色で表示）は、反応液が移動する経路を規定します。流体の一部は、多孔質材料層を通して流れ場から遠ざかり、カソード表面に向かいます。

▶▶ 複雑な形式的ソリューションを作成するためのシンプルなプロセス

マイクロ流路の物理的配置は、流れ場プレートがその性能目標をどの程度満たすかを決定するのに役立ちます。歴史的に、マイクロ流路の設計は、いくつかのよく知られたパターンに従ってきました。より複雑な形状によってパフォーマンスは向上する可能性があります。設計の負担が大きくなります。複雑さによっては、定義、製造、テストに必要な時間が増加します。

Zhou 氏と彼の同僚たちは、設計を最適化する前に、まず設計プロセスを最適化する必要があると考えました。設計を最適化する前に、まず設計プロセスを最適化する必要があることを認識したのです。より高性能な形式的解決策を生み出すため、チームはシミュレーション主導の逆設計手法を作成しました。この手法では、テストを行う前に形状を定義するのではなく、重要なパラメータを設定し、そのパラメータを満たす形状を生成するようアルゴリズムに指示します。

“私たちは、より複雑なシミュレーションが示すものを近似的に示す効率的な方法を模索していました。モデリングの複雑さを多少犠牲にすることで、より精巧な設計を短時間で検討できるようになりました。”と Zhou 氏は言います。“このような問題にトポロジ最適化を使う人もいますが、10流路程度の設計しか思いつきません。複雑な設計を実現するためには、膨大な計算パワーと時間が必要です。”と彼は説明します。

▶▶ 望む結果から斬新な形へ、より速く

では、TRINA の研究チームは、より優れたマイクロ流路設計を効率的に生み出すために、どのような手法を用いればよいのでしょうか？まず、有効異方性多孔質材料を通る理想化された流れの軌跡をシミュレーションし、理想化された流体の挙動を表す値を抽出しました。次に、その値を別のシミュレーションに入力して、

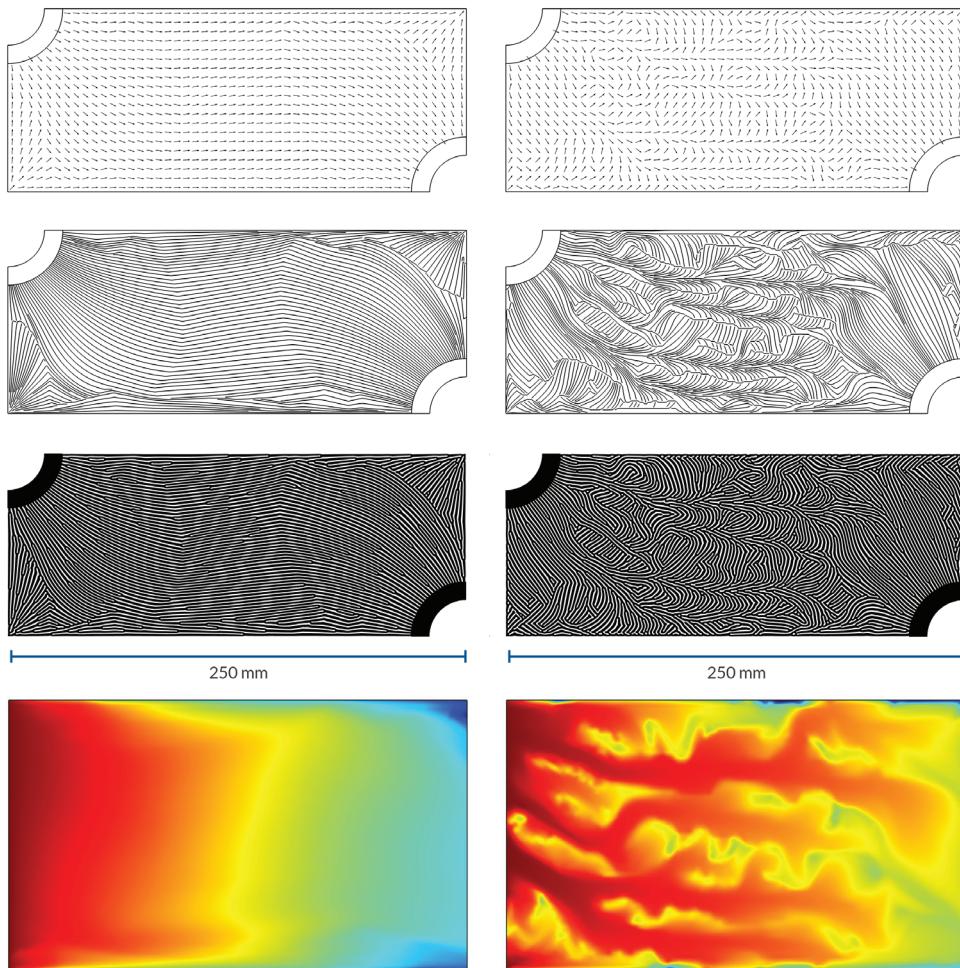


図4 左: 最適化されたマイクロ流路設計。右: 一次的な“動脈”と二次的な“毛細管”の混合を特徴とする、反応に最適化されたマイクロ流路設計。動脈は出口に向かう全体的な流れを維持し、毛細管は電極に向かうより広い反応物の分布を可能にします。どちらの場合も、流体は左上の入口から右下の出口に向かって流れます。

その挙動を引き起こすマイクロ流路の形状を生成しました。基本的には、設計を行う前に、設計に求める効果を定義したのです。

Zhou 氏は次のように説明します。“多孔質材料の COMSOL モデルには2つの材料値しかなく、非常に粗いメッシュです。私たちはナビエ・ストークス方程式と移流反作用拡散方程式に基づいた感度ベースの最適化プロセスを実装しています。定常状態の非圧縮性の層流流体が多孔質媒体を通過し、望ましい化学反応が反応物質の濃度に比例して発生すると仮定します。これらのシミュレーションを実行して、細孔を通る流体

の流れの配向の最適な分布を導きだします。このプロセスにより、計算の複雑さが大幅に軽減され、貴重な結果が得られます。”

Zhou 氏は、設計プロセス全体のこの部分を均質化と説明しています。プレートの細孔を通る流体の理想的な軌道のパターンが確立されたので、次のステップは非均質化です。このステップには、流体をこれらの最適な経路に強制的に従うマイクロ流路形状の方程式に基づく定義が含まれます。

▶▶ 流れ、反応、またはその両方を最大化する生成されたデザイン

非均質化のステップが必要なのは、“それぞれの孔が個別に設計された理想的な多孔質材料は作れないからです。”と Zhou 氏は述べます。理想に近い形で流体を細孔に導くために、壁と流路を設置する必要があります。この設計を生成するために、COMSOL Multiphysics® を使用して、パターン生成用にカスタマイズした偏微分方程式 (PDE) を解いています。このソフトウェアには、結果を可視化するためのプロット機能もあります。

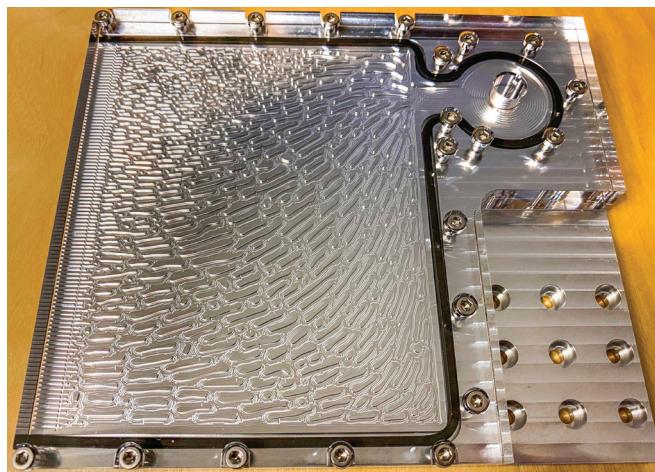


図5 TRINA が作成した設計図に基づく金属削り出し試作流れ場プレート。

TRINA の非均質化方程式によって作成される2つの公式オプションを図4に示します。これらの性能目標は、反応物の流れに対する抵抗を減らし、プレート全体にわたって反応物の供給と反応の均一性を高めることです。これらの目的は、モデルのPDEの支配変数で表されます。この2つの目標に異なる重み付け係数を割り当てることで、Zhou 氏と彼のチームはモデルにさまざまな設計オプションを生成させることができます。そして、各オプションの相対的な利点を評価し、さらなる反復を行うための調整を行うことができます。

左の図4に示した設計について、Zhou 氏は次のように語っています。“流れ場の表面全体で最も圧力損失が小さくなるため、私たちはこれを‘流れ設計’と呼んでいます。モデルは、比較的平行で直線的な経路を生成しました。”

この設計では、流体がプレートを横切って効果的に移動する一方で、多孔質材料層を通して反応物質を均一に分散させることはあまりうまくいきません。シミュレーションによると、この設計の出口側では反応液濃度が低く、反応の均一性と燃料電池の出力が制限される可能性があります。

支配方程式の重み係数が反応の均一性を優先するように調整された場合、モデルは図5に示すような設計を生成します。これを

Zhou 氏は“反応設計”と呼んでいます。現在、高い反応物濃度（下の画像の赤とオレンジで示されている）が優勢となっており、利用可能な反応物のより大きな割合が使用されていることを示しています。“反応設計”マイクロ流路の複雑な形状は、生物学を学ぶ人にとってはよく知られたものに思えるかもしれません。

“ほとんどの商業用マイクロリアクターは、‘流れ設計’に似た設計を使用しています。”と Zhou 氏

## “エンジニアは側枝のないまっすぐな水路を好むかもしれないが、自然は反応デザインを選ぶ。”

— YUQING ZHOU, TRINA, リサーチサイエンティスト

は言います。しかし、葉、肺、血管など、流体反応物を分配する自然に存在するシステムは、右の図4の形態により似ています。

“エンジニアは側枝のないまっすぐな流路を好むかもしれませんが、自然は‘反応設計’を選ぶのです。”と Zhou 氏と言います。TRINA チームの研究論文によれば、これまでも、自然な形、フラクタルな形、階層的な形を先験的に選択した流れ場の流路を実験した例はありますが、“このような大規模な枝分かれした流れ場が、所定のレイアウトを仮定しない逆設計的アプローチによって発見されたのは今回が初めて”だということです。

### ▶ 未来を予測するよりも、未来を創造しよう

先に示した“流れ対反応”の比較に加え、TRINA は図4の特性を組み合わせた2つの設計を行いました（図には示していません）。

TRINA の4つの反復設計のどれもが、主要な反応と流体の性能指標において、ベースラインの従来設計を上回りました。TRINA チームによって製作され、実験的にテストされた追加の設計を図に示します。

では、理想的な流れ場プレートのデザインとはどのようなものでしょうか？ ガソリン自動車に代わる理想的な技術がひとつではないのと同じように、そのようなものは存在しません。“私たちの観点では、エンジニアが検討できるように複数の良い選択肢を提供することで成功しています。”と Zhou 氏と言います。Yuqing Zhou 氏は、彼と彼の同僚を導くアドバイスをいくつか紹介してくれました。私たちのチーフサイエンティストは、“未来を予測することをやめて、未来を創造することだけに取り組まなければならない。”と言っています。◎



プロジェクトの中心メンバー4人。左から右へ： Ercan M. Dede 氏、Tsuyoshi Nomura 氏、Yuqing Zhou 氏、Danny J. Lohan 氏。Nomura 氏は日本の豊田中央研究所に所属し、他のメンバーは北米豊田研究所に所属しています。

COMSOL, Massachusetts, USA

# RF MEMS 共振器, 通信システムの構成要素

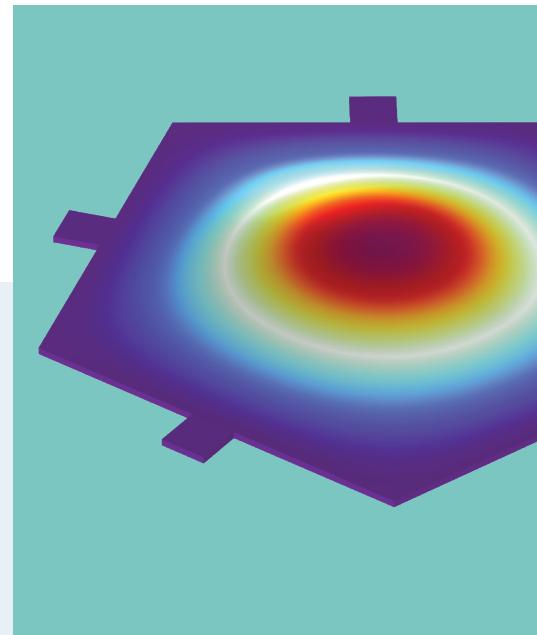
JOSEPH CAREW 著

MEMS 共振器の開発により、機械式共振器は RLC 回路よりもはるかに小型に作成できるため、今日私たちが知っているハンドヘルドデバイスが可能になりました。もちろん、MEMS の成功物語はこれで終わりではありません。メーカーは革新を続けており、最新のトレンドには、これらのハンドヘルドデバイスに 5G 通信機能が組み込まれています。MEMS 共振器はプロセスの大きな部分を占めており、マルチフィジックスモデリングとシミュレーションは、RF MEMS デバイス設計の継続的な革新にとって価値があることが証明されています。

開発サイクルにおいて、MEMS デバイスのプロトタイプ製作には、コストのかかる多くの処理工程が必要です。マルチフィジックスシミュレーションは、物理的なプロトタイプを作製する必要性を減らしながら、学習サイクルを高速化します。さらに、この部品は最終的に電子回路と統合されるため、メーカーは共振器を単独で設計するのではなく、電子システムの一部として設計する必要もあります。

今日、RF MEMS は通信システムの構成要素となっています。表面弾性波 (SAW) 共振器は、低周波数帯 (例えば 2.5 GHz) で動作し、これらのデバイスの最も初期の例です。後に開発されたバルク音響波 (BAW) 共振器は、より高い周波数 (例えば 8 GHz) に対応するために作られましたが、より複雑な設計が特徴です。このグループの共振器には、薄膜バルク音響共振器 (TFBAR または FBAR) や固体実装共振器 (SMR) などのバリエーションがあります。ラムウェーブ共振器 (LWR) は、SAW 共振器のインターデジタルトランスデューサーと BAW 共振器の吊り下げ構造を組み込み、両者の利点を実現したものです。LWR の設計は、電気機械物理の連成を考慮すると、マルチフィジックスシミュレーションの役割を際立たせ、より複雑なものとなります。

RF MEMS デバイスの設計プロセスでシミュレーションを使用する利点を示すため、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して 3 つのモデルを作成しました。



## 薄膜バルク音響共振器

今日、ほとんどのスマートフォンには FBAR のいくつかの例が含まれています。例えば、FBAR はスマートフォンの RF フィルターに使用され、周波数の送受信を可能にしています。

振動エネルギーを最大限に閉じ込めることを目的に、5面アポダイズ FBAR 設計のマルチフィジックスモデルが開発されました。この特定のモデルは、約 3.25 GHz で直列共振するように設計され、窒化ケイ素支持層、モリブデン下部電極、窒化アルミニウム圧電層、アルミニウム上部電極の積層部品で構成されています。デバイスはアンカーポイント (タブ) に吊り下げられ、圧電薄膜材料 (一対の電極の間に位置する) がバルク音響波を発生させる場所となります。

効果的な FBAR を実現するためには、設計段階で共振周波数やその他の性能指標を予測するための入念なシミュレーションが必要です。使用する材料や FBAR の全体的なレイアウトは、その性能に寄与します。マルチフィジックスモデリングは、物理的なプロトタイプ製作にリソースを投入する前に設計を評価する効率的な方法です。

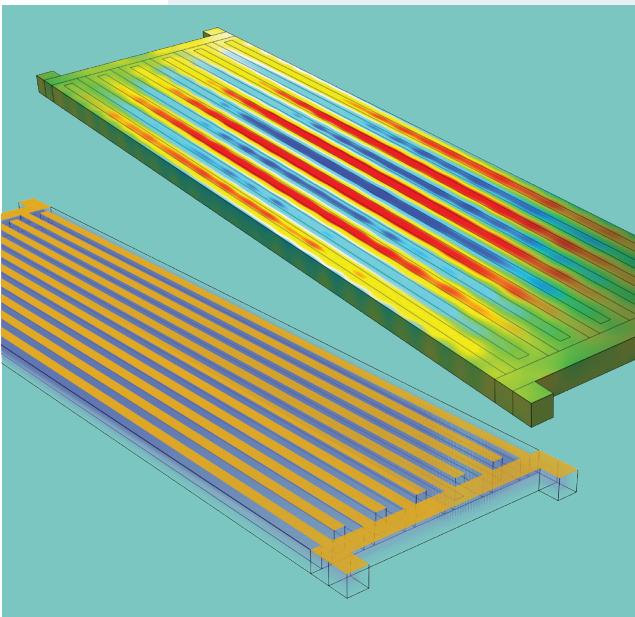
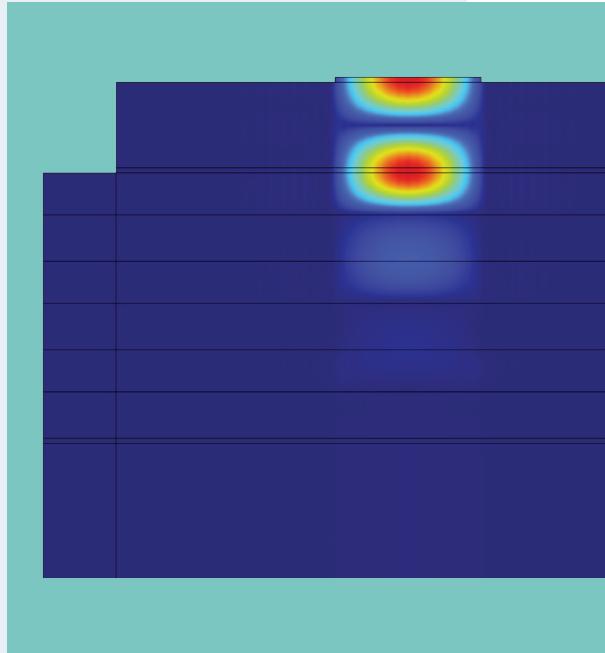
## 固体実装共振器

FBAR の一種である SMR は堅牢であり、一般的に BAW に比べ共振周波数が高くなります。これらのデバイスの音響ミラー部分は、音響インピーダンスの高い材料と低い材料を交互に積層したものです。これにより、音響エネルギーが圧電活性層内に閉じ込められます。SMR は、RF フィルター、発振器、アクチュエーター、センサーとしても使用されています。

写真の SMR は、厚い基板の上の音響ミラーの上に形成された微細加工圧電 MEMS 共振器です。この 2D モデルでは、モリブデン (高インピーダンス) 層と二酸化ケイ素 (低インピーダンス) 層が交互に配置されていますが、実際の配置パター

ンはさまざまです。SMR では層が交互に配置されるため、製造プロセスが複雑になりますが、シミュレーションを使用してミラー材料の厚さを最適化し、音響反射率とエネルギー閉じ込めを最大化することができます。また、シミュレーションを使用して、製造のばらつきがデバイスのパラメーターに与える影響を確認することもできます。

世界が 5G に移行し、6G が予想される中、SMR と FBAR の設計上の課題は激化しています。より高い動作周波数、より広い帯域幅、高い Q ファクターが求められるため、正確なマルチフィジックスシミュレーションが必要となります。



## ラム波共振器

LWR は、BAW 共振器と SAW 共振器の長所を兼ね備えているため、大きな注目を集めています。SAW 共振器が直面する低共振周波数の制限と集積化の問題と、圧電 BAW 共振器が直面する多周波数対応の問題の両方を解決します。具体的には、窒化アルミニウム (AlN) LWR は、優れたパワーハンドリング能力と高い Q ファクターを特徴としています。

音響波の伝導に最適な選択肢として AlN が登場したことから、我々は AlN LWR のマルチフィジックスモデルを構築しました。LWR は、RF MEMS デバイスの中でも比較的新しいデバイスであり、ここで紹

介するデバイスの中で最も複雑で高性能なデバイスです。実際には、実際の構成パターンはさまざまであり、LWR は所望の効果を達成するためにさまざまな電極構成を特徴とすることがあります。

電極パターンとデバイス性能の間には複雑な関係があるため、シミュレーションが難しいデバイスとなります。さらに、損失メカニズム (アンカー損失など) が性能に影響する可能性があります。これを考慮する必要があります。マルチフィジックスシミュレーションは、これらのニーズに対応することができます。



Heidelberg Materials, Norway and Sweden

# 建設現場にマルチ フィジックスシミュ レーションを導入 する

時間、温度、材料の選択、気象条件、および打設技術はすべて、建築物の建設に使用されるコンクリートの早期時効性能に影響を与える可能性があります。Heidelberg Materials 社では、重要な変数がプロジェクトにどのような影響を与えるかについて、顧客が十分な情報を得た上で意思決定できるよう、コンパイルされたシミュレーションアプリケーションによる予測マルチフィジックスモデリング機能を提供しています。

ALAN PETRILLO 著

コンクリートは、質素な住宅から高くそびえる橋や高層ビルまで、数え切れないほどの構造物の基本的な部分です。しかし、コンクリートがその長寿命という約束を果たすためには、建設業者は建設過程で適切な決定を下さなければなりません。彼らの選択は、コンクリートが硬化、または成熟する速度に影響を与え、その長期的な強度と耐久性を決定するのに役立ちます。

請負業者は、成熟度法を使用することにより、コンクリート打設プロセスの潜在的な結果を予測することができますが、現場でこの技術を適用することは困難な場合があります。このため、セメント、骨材、プレキャスト生コンクリートの世界最大級のサプライヤーである Heidelberg Materials 社は、スウェーデンとノルウェーの顧客に HETT と呼ばれるコンピュータプログラムを提供しています。Heidelberg Materials 社は、HETT の複数世代の開発に参加してきましたが、新バージョンは一味違います。HETT22 は、現場の状況、周囲温度、材料の選択、その他の関連変数を考慮したマルチフィジックスモデルに基づく予測にタイムリーにアクセスできる、コンパイルされたシミュレーションアプリです。

図1 コンクリート構造物の強度と耐久性を確保するために、請負業者は気象条件など、コンクリートの早期性能に影響を与える要因を考慮しなければなりません。

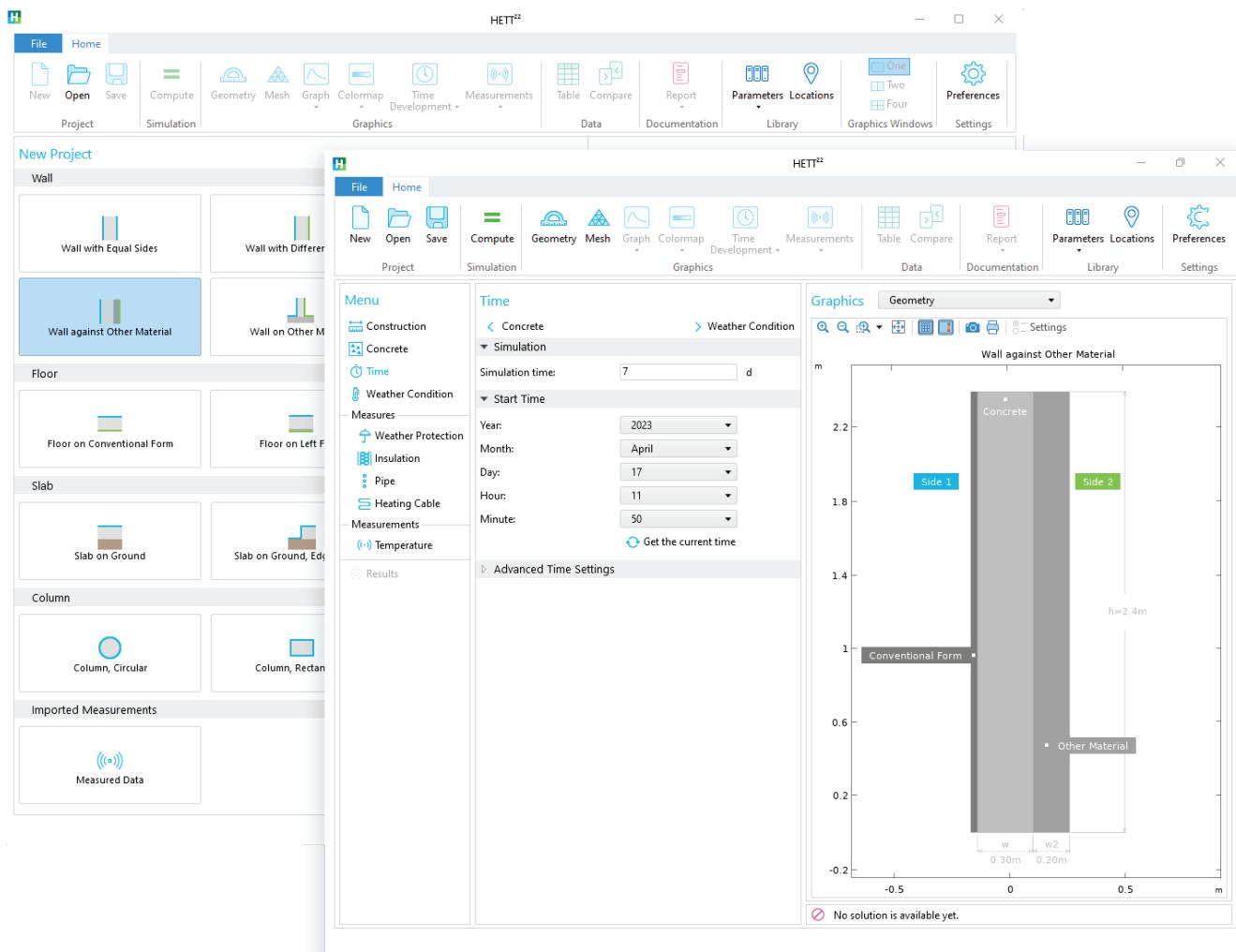


図2 サンプルモデルの構築を示す HETT22 アプリ。

HETT22 とその関連モデルは、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用してマルチフィジックスモデルとシミュレーションアプリを構築することを専門とする COMSOL 認定コンサルタントの Deflexional 社によって Heidelberg Materials 社のために作成されました。アプリケーションビルダーを使用してモデルをカスタムアプリに変換した後、Deflexional 社は COMSOL Compiler™ を使用してこれを展開しました。発売後わずか6か月で、HETT22 は1100回以上ダウンロードされました。

“HETT22 は、さまざまな観点から選択肢を評価するのに役立ちます。”と、Heidelberg Materials 社の Cement Sverige 社 (旧 Cementa 社) で HETT プログラムのプロジェクトマネージャーを務める Mikael Westerholm 氏は言います。シミュレーションを使用して早期成熟プロセスの潜在的な結果を予測することで、請負業者は、決定が事実上固まる前に、建設代替案に関する選択に自信を持つことができます。

### ▶▶ 時間、温度、セメント水和のトレードオフ

コンクリートの熟成と強度発現を制御する化学プロセスには複数の要因が影響しますが、特に重要な役割を果たすのが温度です。

“セメントと水の化学反応であるセメント水和は、多くの熱を発生させます。”と、Heidelberg Materials 社の Sement Norge 社 (旧 Norcem 社) のテクニカルマネージャー、Tom Fredvik 氏は説明します。“セメン

トの水和速度は温度に大きく依存します。温度が高いほど、水和と強度発現が速くなります。”

急速な水和は必ずしも望ましいものではありません。暑い天候で早く硬化するコンクリートは、涼しい条件下でゆっくり熟成するコンクリートよりも弱くなる可能性が高く、逆に、氷点下の気温も強度発現を損なう可能性があります。“特に冬場に打設する場合は、こうした影響を考慮することが非常に重要です。”と Fredvik 氏は言います。“最悪の場合、コンクリートが十分な強度を得る前に凍結してしまうと、永久的な凍害を被る可能性があります。”

請負業者は、型枠を断熱し、自由なコンクリート表面を断熱材で覆って凍結のリスクを軽減し、外部からの熱を加えることもできま

す。このような技術は、過熱、早期乾燥、建設プロジェクトの大幅なコスト増を避けるため、慎重に適用されなければなりません。

### ▶▶ 成熟度法による強度発達の推定

熱管理戦略に着手する前に、請負業者は成熟度法を使って特定のプロジェクトの潜在的な結果を予測することができます。“成熟度法は、温度がコンクリートの強度発現にどのような影響を与えるかを推定するために、50年以上にわたって使用されてきました。コンクリートが打設された後のコアサンプルを分析することでしか求めることのできない強度を予測するための非破壊的な方法です。”

成熟度法は、既知の指標と現場およびプロジェクト固有のデータ

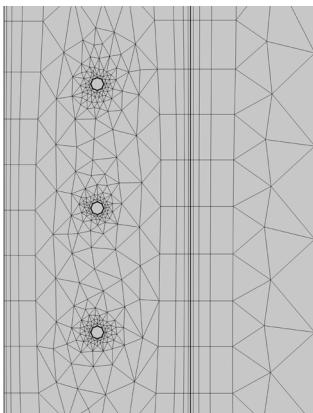


図3 壁モデルの2D境界層メッシュ。

を組み合わせたものです。コンクリートミックスの成熟度関数と基準強度の値は事前に得ることができますが、コンクリートが曝される温度は推定しなければなりません。この推定温度曲線は、周囲温度とセメントの水和によって発生する内部熱を考慮する必要があります。実際の温度レベルは、特定のコンクリート打設の体積全体にわたって均一に変化するわけではないため、強度も不均一になる可能性があります。

### マルチフィジックスシミュレーションを請負業者の手に

Heidelberg Materials社は、シミュレーションの予測可能性をより広く利用できるようにするため、Deflexional社にHETTの最新バージョンの作成を依頼しました。“Heidelberg社のチームが彼らの目標を説明したとき、HETTの有用性を拡大する絶好の機会を見出しました。”と、Deflexional社のCEOであるDaniel Ericsson氏は述べています。HETT22は、COMSOL Multiphysicsソフトウェアのアプリケーションビルダーを使用して開発され、COMSOL Compilerを使用してコンパイルされた第一世代のプログラムです。

“HETT22では、できる限りユーザーフレンドリーにすることが私たちの目標の1つでした。”とFredvik氏は言います。“また、お客様が現実世界の状況をより詳細に検討できるようにする新機能も追加しました。”

架空のコンクリート casting プロジェクトの簡単な説明で、HETT22の拡張された機能が示されています(図2)。アプリのユーザーは、さまざまな建設シナリオを表す典型的なケースのリストから選択することから始め、次に、 casting 形状パラメーター、材料混合、コンクリートの強度クラス、時間枠、および予想される気象条件を定義します。このモデルは、 casting の物理的環境がその動作にどのような影響を与えるかを説明します。

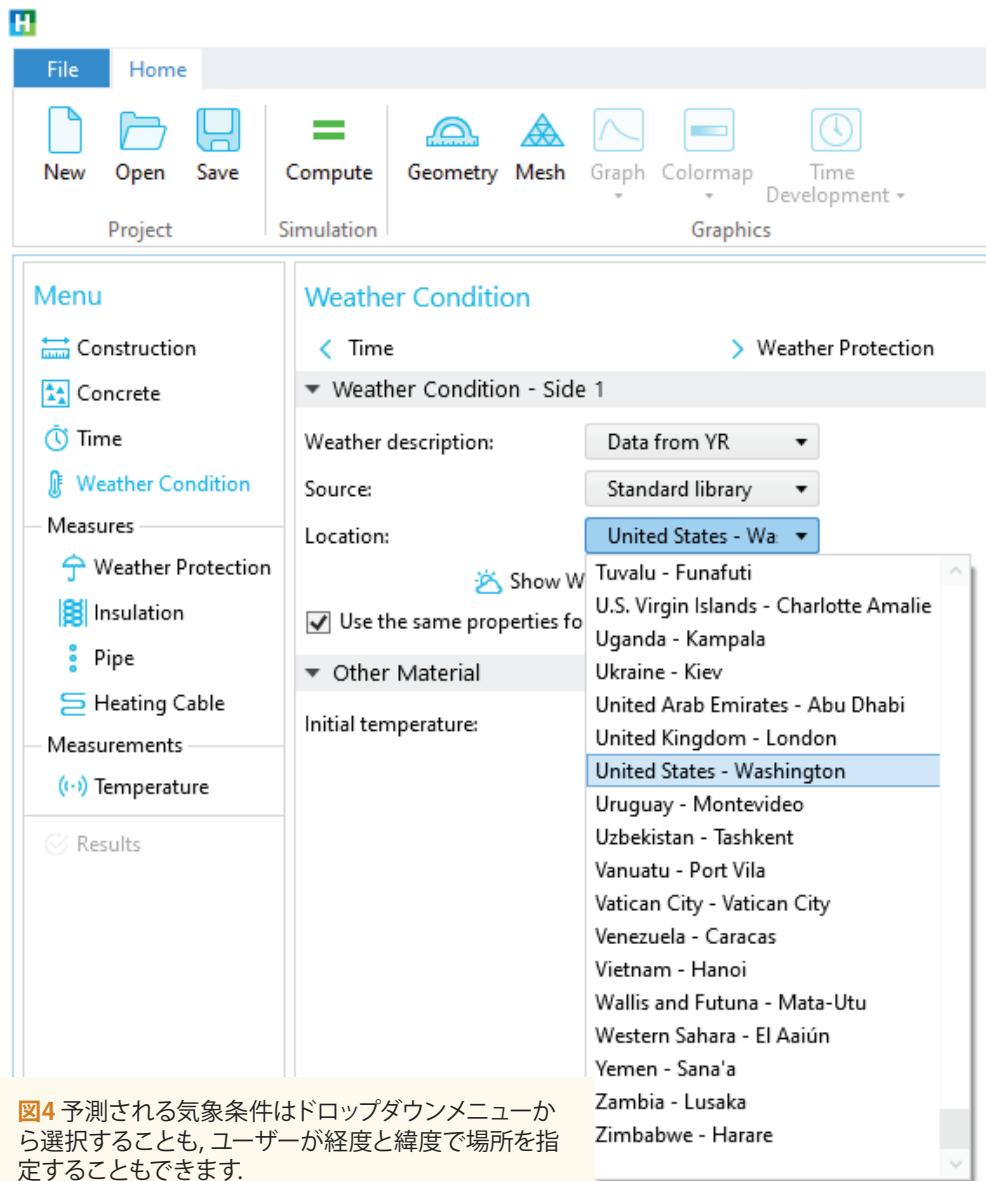


図4 予測される気象条件はドロップダウンメニューから選択することも、ユーザーが経度と緯度で場所を指定することもできます。

“既存のスラブ上に新しいコンクリート型枠を打設する場合、新旧の型枠の接合は非常に重要です。HETT22は、その接合部の周囲で何が起きているかを分析する能力を与えてくれます。”コンクリートの温度や強度発現に影響を及ぼす可能性のあるその他の関連する物理的属性( casting 内部の加熱ケーブルや加熱/冷却パイプの存在など)も、モデルに組み込むことができます。モデルの形状とメッシュを図3に示します。

型枠と形状を定義した後、ユーザーは、計画された打設のための

現場固有の気象予測を統合することができます(図4)。全世界の天気予報が自動的にダウンロードされ、モデルの適切な境界条件に変換されます。“事前に予報を選択するだけでなく、養生期間中に現場で記録された温度をHETT22に提供し、測定条件が予想と大きく異なる場合に調整を行うこともできます。”とFredvik氏は言います。

時間的制約と希望強度は、ユーザーの材料選択に大きな影響を与えます。“この例では、型枠を取り外す前に必要な強度を15 MPaに設定しています。”と

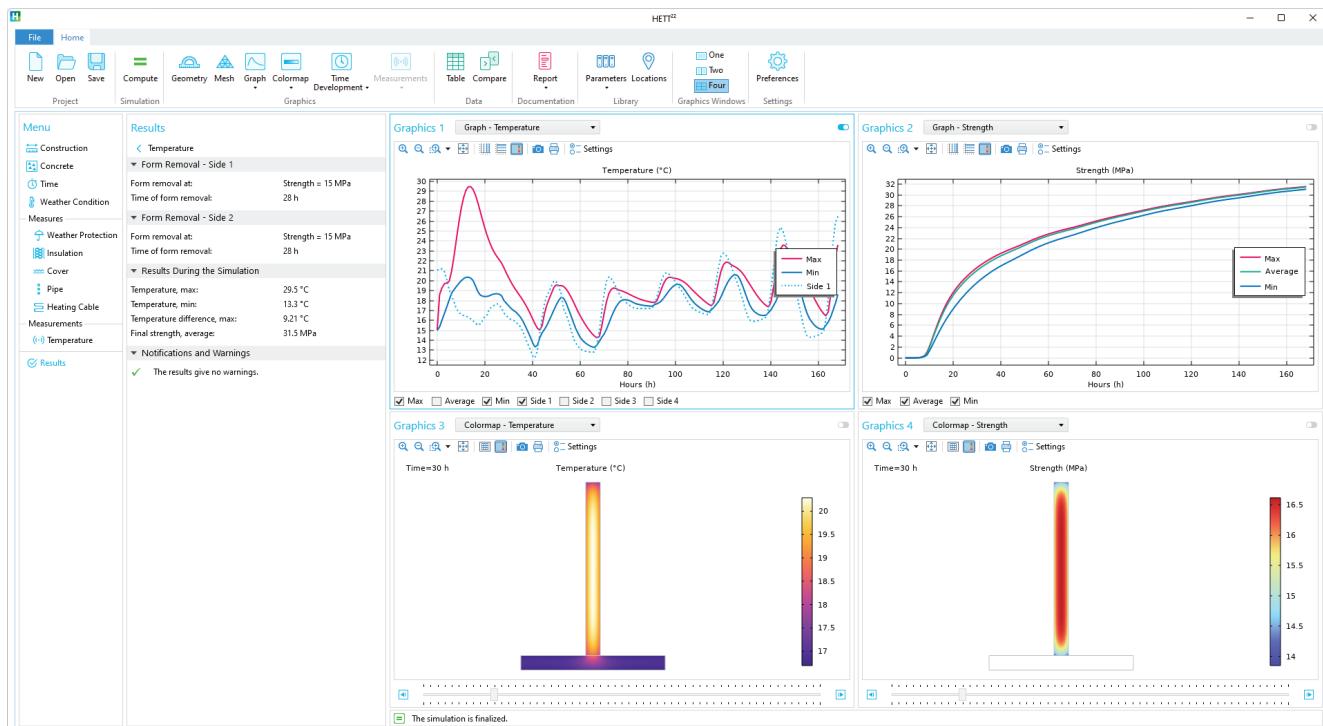


図5 コンクリート鑄物の温度と強度を示すシミュレーション結果。

Westerholm 氏は言います。“ユーザーは、コンクリートと混合する補助的なセメント材料を選択することもできます。これらの材料には、フライアッシュ、高炉水砕スラグ、シリカフュームなどがあります”と説明します。

これらの材料は、エネルギー生産、鉄やフェロシリコンの加工など、他の産業からの副産物です。セメントやコンクリートへの添加剤に副原料を使用することで、コンクリート建設の二酸化炭素排出量を削減することができます。“CO2 排出量の削減は、世界中のコンクリート業界の焦点です。”と Westerholm 氏は言います。“しかし、これらの代替材料は、水和が遅くなったり、強度発現特性が異なったりする可能性があります。私たちは、HETT2 が

## “強度を予測する非破壊的な方法です。”

— MIKAEL WESTERHOLM,  
PROJECT MANAGER,  
HEIDELBERG MATERIALS

ユーザーのよく知らないコンクリートの挙動を予測するのに役立つことを望んでいました。”

### シミュレーション結果が導く先制調整

COMSOL モデルを使用したアプリを実行すると、型枠を取り外すまでに必要な強度（この例では 15 MPa）を達成するのにかかる時間を決定する特性の予測値が得られます。“周囲の空気と土壌の予想温度を追跡し、コンクリート自体の温度曲線を予測することができます。（図5）”と Fredvik 氏は言います。“私たちの温度展開に基づけば、打設全体が必要な強度に達するまで約30時間かかるかと計算できます。”それがこの特定の作業には長すぎる場合、HETT2 は、異なるコンクリートの選択が型枠撤去の推定時間に及ぼす潜在的な影響を示すことができます。建設業者は、Heidelberg Materials 社のコンクリート製品のメニューからさまざまなオプションを選択し、シミュレーションアプリで各オプションの性能特性の詳細を直接確認することができます。

実際の気象条件が予報と異なる場合はどうでしょうか？その場合、ユーザーは温度値を調整し、強度発現にどのような影響があるかを確認することができます。“大気の状態や風速が大きく変われば、型枠を予想より早く取り外せる可能性があります。”と Fredvik 氏は言います。

### マルチフィジックスシミュレーションが費用対効果分析をサポート

物理的条件に関連する選択の影響を予測することで、建設チームはコンパイルされたシミュレーションアプリを使用して、各プロジェクトの経済性と二酸化炭素排出量をより適切に管理できます。たとえば、気温が低いために低炭素コンクリートの鑄造に時間がかかりすぎることが天気予報で示された場合、請負業者は潜在的な費用と利益のトレードオフに直面することになります。

“たとえ高価で、カーボンフットプリントが高くなる可能性があったとしても、より早く硬化するセメントや、より強度の高いコンクリ

ートへと切り替えるべきでしょうか？”と Westerholm 氏は問います。“あるいは、当初の計画を維持し、代わりに断熱や型枠の保温のための措置を講じることは可能でしょうか？”

Heidelberg 社は、何百もの具体的なレシビの候補を顧客に提供しています。同社の観点からすると、このシミュレーションアプリは、潜在的に困難な選択肢の数々を補完するために必要なものです。COMSOL Multiphysics ソフトウェアの予測モデリング機能は、アプリのカスタムインターフェースを通じて提供されるため、ユーザーは十分な情報に基づいた意思決定をより効率的に行うことができます。

“これが、当社が HETT2 を顧客に提供する理由です。”と Fredvik 氏は言います。“コンクリート打設作業の各決定ポイントにおいて、HETT2 が付加価値を提供するため、私たちはこのアプリを技術サポートの中核部分と見なしています。”◎

INFICON, Liechtenstein

# シミュレーションによる電離ゲージの性能の向上

高真空または超高真空 (HV/UHV) 環境で圧力を測定するためのより優れた電離真空計を開発するために, Liechtenstein の機器メーカー INFICON はマルチフィジックスモデリングを使用して新しい設計をテストし, 改良しました。

ALAN PETRILLO 著



図1 IRG080. 画像提供: INFICON.



図2 Bayard-Alpert ホットフィラメント電離計. 画像提供: INFICON.

イノベーションはしばしば競争の一形態となります。標準化された道具がゴールへの進捗を測定する、創造的な人々間の競争と考えることができます。技術革新を目指す多くの人々にとって、そのようなツールの一つが真空計です。

高真空および超高真空 (HV/UHV) 環境は、多くの製造品の研究、精製、製造に使用されています。しかし、イノベーターは、施設の真空チャンバー内の圧力レベルが他の施設の圧力レベルと本当に一致していることを、どのようにして確認できるのでしょうか？基準を共有し、これらの基準を満たすための信頼できるツールがなければ、真空チャンバーとテストされる製品の両方について、主要な性能測定基準が比較できない可能性があります。

## ▶ 世界的な競争で勝利を収めたプロトタイプが誕生

INFICON が設計、製造したイオン基準ゲージ 080 (IRG080) は、HV/UHV 環境における圧力を定量化するためのより優れたツールを開発する多国籍プロジェクトの成果です。

このセンサーの開発は、欧州計測技術革新研究プログラム (EMPIR) によって調整されました。EMPIR は、ヨーロッパの「研究とイノベーションのシステムを世界規模でより競争力のあるもの」にすることを目的とした、民間企業と政府の研究機関による共同の取り組みです。プロジェクト参加者は、INFICON の設計がパフォーマンス目標を最もよく満たすものであることに同意する前に、複数のオプションを検討しました。



図3 INFICON の IE514 物理ゲージ

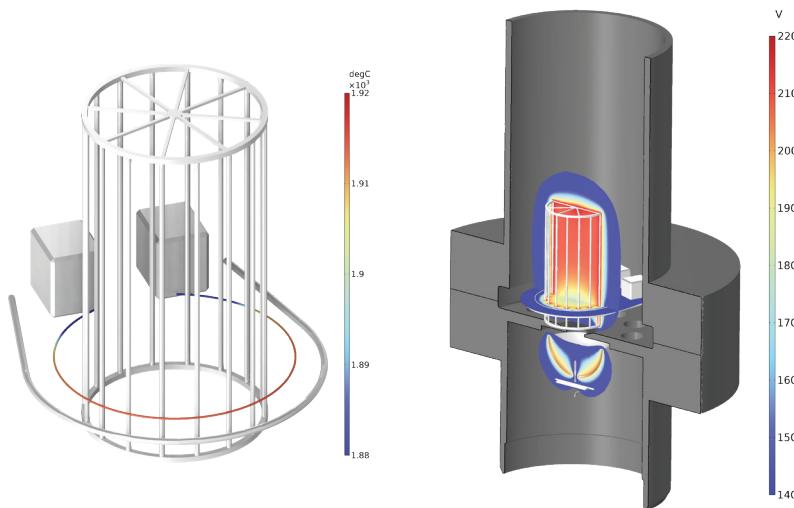


図4 フィラメント温度 (上) とグリッド構造周囲の電位 (下) を示す IE514 シミュレーション結果。

内を循環している浮遊ガス分子と衝突します。ガス分子と衝突した電子はイオンを形成し、コレクターに向かって流れます。コレクター内のこの測定可能なイオン電流は、チャンバー内のガス分子の密度に比例します。

“理想気体の法則に従って、密度を圧力に変換できます,”と Wüest 氏は言います。“圧力は、イオン流を電子流で割った値を、チャンパー内のガスに応じて調整される感度係数で割った値に比例します。”

### » 既存のゲージは熱と乱暴な取り扱いに弱い

Bayard-Alpert 電離真空計について注意すべき点は、その校正が日常的な取り扱いによって簡単に損なわれてしまうということです。

“典型的な電離真空計には、バネによる張力で保持されている微細な金属構造が含まれています,”と Wüest 氏は言います。“デバイスを使用するたびに、フィラメントは 1200°C まで加熱されます。そして 2000°C になると、スプリング内の金属に影響を与え、フィラメントの形状を歪ませる可能性があります。これにより、電子の流れの開始位置と電子がたどる経路が変わります。”

熱に敏感であることに加えて、Bayard-Alpert ゲージの主要な部品は位置がずれやすい場合があります。これにより、10~20% の測定の不確実性が生じる可能性があります。“その結果、ほとんどの真空チャンパーシステムは過剰に構築されています,”と Wüest 氏は述べており、頻繁にゲージを再校正する必要があるため、開発時間と費用も無駄になります。

### » ベンチマーク設計のシミュレーションモデルの構築

プロジェクトチームは、このゲージを窒素ガスの検出に使用する場合の測定不確かさの目標を 1% 以下に設定しました。もう1つの目標は、各ゲージおよび検出されるガス種ごとにガス感度係数を再校正する必要をなくすことでした。新しい設計の性能は、軽微な衝撃の影響を受けず、複数のメーカーで再現できる必要がありました。

これらの目標を達成するために、プロジェクトチームはまず HV/UHV 測定の研究に専念しました。その研究には、260件の関連研究の広範なレビューが含まれていました。レビューを完了した後、プロジェクトパートナーは、電離真空計設計の現在のベストプラクティスを組み込んだ設計を1つ選択しました。それは、INFICON の IE514 エクストラクタータイプゲージです。INFICON と他の2つのプロジェクト参加者、NOVA 大学 Lisbon とヨーロッパの研究機関 CERN は、それぞれ IE514 設計のシミュレーションモデルを開発しました。新しい設計に進む前に、各モデルによって生成され

### » イオン化によるガス密度の決定

“真空プロセスを含まないハイテク製品はほとんどありません,”と INFICON のセンサー技術責任者 Martin Wüest 氏は述べています。

“真空”という用語は、理論的には絶対的な不在を表すことができますが、実際の空間の空虚さは通常、程度の問題です。さまざまな真空度を測定するには、圧力レベルを決定するためのさまざまな方法が必要です。“大気圧に近い圧力では、容量性ダイヤフラムゲージを使用できます。中真空では、対流を介して発生する熱伝達を測定できます,”と Wüest 氏は言います。これらのアプローチはどちらも、HV または UHV 圧力レベルでは効果的ではありません。

“HV/UHV 圧力では、ダイヤフラムを動かすのに十分な粒子が存在せず、熱伝達を確実に測定することもできません。ここで、イオン化を使用してガス密度と対応する圧力を決定します,”と Wüest 氏は説明します。

最も一般的に使用される HV/UHV 圧力測定ツールは、真空チャンパー内に設置される Bayard-Alpert ホットフィラメントイオン化計 (図2) です。この機器には、フィラメント、グリッド、イオンコレクターが含まれています。その動作は、フィラメントに低電圧電流を供給することから始まり、フィラメントが加熱されます。フィラメントが熱くなると、より高い電圧が供給されるグリッドに引き付けられる電子を放出します。グリッドに向かっておよびグリッド内を流れる電子の一部は、真空チャンパー

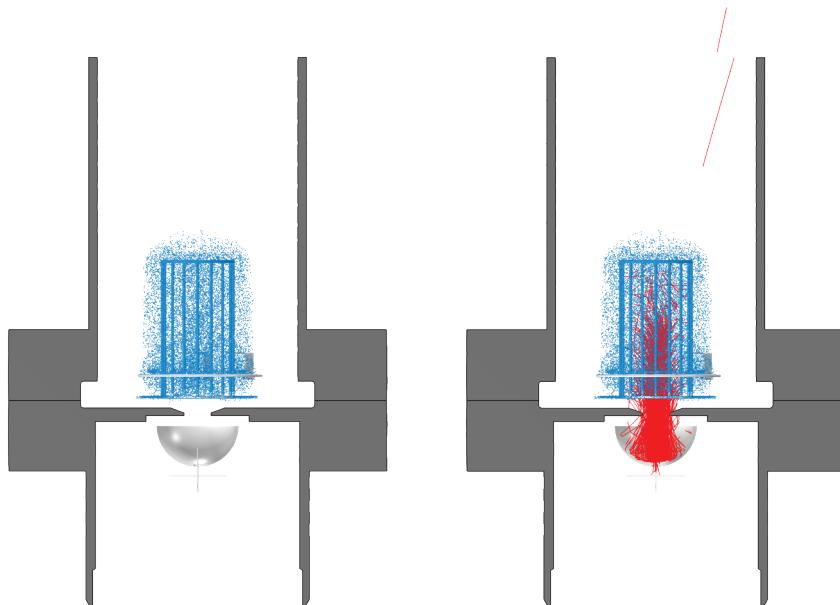


図5 IE514における電子(青)とイオン(赤)のシミュレーションされた経路を示す粒子追跡モデル。

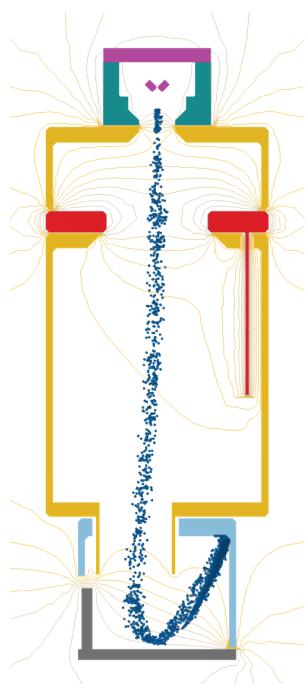


図6 IRG080 ゲージの COMSOL モデル。

た結果が IE514 ゲージの物理プロトタイプからのテスト結果と比較され、モデルの精度が確認されました。

INFICON エンジニアの Francesco Scuderi 氏は、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して IE514 をモデル化しました(図3)。このモデルにより、フィラメントからの熱電子放出とそれらの電子によるガスのイオン化の分

析が可能になりました。このモデルは、生成されたイオンがコレクターに向かう経路を追跡するためにも使用できます。これらのシミュレートされた出力を使用して、Scuderi 氏は、放出された電子ごとに検出されるイオンの数に基づく期待感度係数を計算できました。これは、モデルの全体的な忠実度を実際のテスト結果と比較するための有用な指標です。

“モデルのジオメトリとメッシュを構築した後、シミュレーションの境界条件を設定します。”と Scuderi 氏は説明します。“私たちは、電子放出とフィラメント温度の結合関係を表現しようとしています。この温度は、フィラメントの長さ全体にわたって約1400°C から2000°C まで変化します。この変化は、電子の分布と電子がたどる経路に熱電子的に影響します。”(図4)

“熱条件と電場がシミュレーションできたら、粒子追跡シミュレーションを開始できます。”と Scuderi 氏は続けます。“このソフトウェアを使用すると、グリッドへの電子の流れと、その結果として生じる結合加熱効果を追跡することができます。”次に、モデルを使用して、ガス粒子と衝突する電子の割合を計算します。そこから、生成されたイオンの光線追跡を実行して、コレクターに向かうイオンの経路を追跡できます(図5)。

“その後、循環する電子の量をイオンの数とその位置と比較することができます。これからコレクター内のイオン電流の値を推定し、感度係数を計算することができます。”と Scuderi 氏は言います。

INFICON のモデルは、ベンチマークプロトタイプのテスト結果と厳密に一致する値をシミュレートしました。これによりチームは、モデル化された設計への変更が、イオン化エネルギー

ギー、電子とイオンの経路、放出電流と透過電流、感度などの主要な指標にどのような影響を与えるかを観察できるようになりました。

## » シミュレーションにより、より堅牢なゲージが実現

INFICON の設計プロセスの最終製品である IRG080 には、既存の Bayard-Alpert ゲージと同じ部品が多く組み込まれていますが、主要な部品の外観はまったく異なります。たとえば、新しい設計のフィラメントは、細いワイヤーではなく、固体の吊り下げられたディスクです。グリッドは繊細なワイヤーケージではなく、より強力な成形金属部品で作られています。コレクターは2つの部品で構成されています。イオンを引き付ける単一のピンまたはロッドと、実際に電子の流れをコレクターから離れてファラデーカップに向けるのに役立つ固体金属リングです。この配置は、COMSOL Multiphysics ソフトウェアを使用した粒子追跡シミュレーションを通じて改良され、イオンと電子の経路をより適切に分離することで精度を向上させます。

テストの結果、IRG080 は測定の不確かさを1%未満に低減するという目標を達成したことが示されました。感度に関しては、IRG080 はベンチマークよりも8倍優れたパフォーマンスを示しました。同様に重要なことは、INFICON プロトタイプは複数のテストセッションで一貫した結果をもたらし、ベンチマークゲージよりも13倍優れた感度再現性パフォーマンスを実現したことです。プロジェクト中に23個の同一のゲージが構築およびテストされ、INFICON が HV/UHV 状態を測定するためのより正確で堅牢かつ再現可能なツールを作成したことが確認されました。

イオンゲージプロジェクトの完了に際し、INFICON チームは IRG080 自体という印象的なトロフィーを掲げました。もちろん、この成功はチームだけのものではありません。INFICON はパートナーのサポートから恩恵を受けました。その結果、より広範な科学および製造コミュニティが、HV/UHV 状態のより一貫した測定から恩恵を受けることになります。◎

## 謝辞

EMPIR 電離真空計プロジェクトの参加者には、Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Cesky Metrologicky Institut Brno, Institut za Kovinske Materiale in Tehnologije, Laboratoire national de métrologie et d'essais, RISE Research Institutes of Sweden AB, European Organization for Nuclear Research, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa, VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH, INFICON Aktiengesellschaft が含まれています。

COMSOL, Massachusetts, USA

# 小型衛星の熱モデリング

WALTER FREI 著

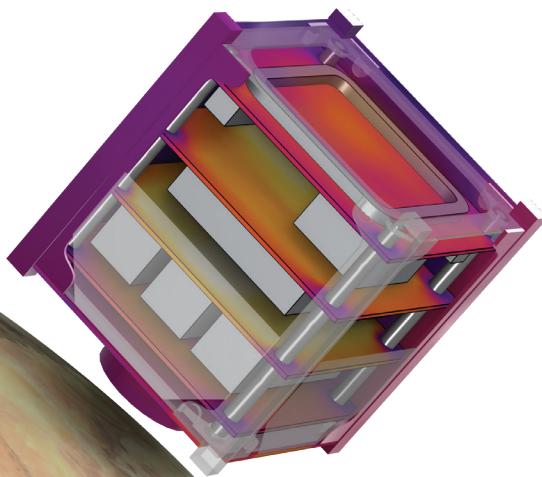


図1 軌道上の衛星の熱伝達シミュレーション。温度分布を示します。地球の画像クレジット: Visible Earth および NASA。

ここ数年で、軌道上の衛星の数が劇的に増加しました。この増加の大部分は、新しい衛星の小型化によるものです。最大の軌道構造物である国際宇宙ステーションはフットボール場よりも大きいですが、今日軌道上にある衛星のほとんどはフットボールほどまでに小型化されています。これは、10 cm x 10 cm x 10 cm のサイズに収まるいわゆる 1U 衛星を備えたキューブサットフォームファクターの人気による部分もあります。サイズが小さいため、1つのロケットから複数の衛星を打ち上げることができます。当初は主に学術目的で構想されていましたが、現在では 1U から 24U までの設計ソリューションを提供する堅牢な商用エコシステムが存在し、キューブサットの使用は驚くべき速度で増加しています。

キューブサットの設計（および他の小型衛星の設計）の特徴の1つは、非常にコンパクトであることです。多くの小型カメラ、センサー、計器、アンテナ、電池、姿勢制御システム、その他の電子機器が密集しているため、廃熱が発生する可能性があります。この熱を周囲の空間に適切に放射するように衛星を設計することは、エンジニアリング上の主要な懸念事項の1つです。エンジニアはさまざまな電子部品が特定の温度範囲内に保たれるようにする必要がありますが、熱勾配によって望ましくない構造変形が生じる可能性があるため、これは困難な場合があります。本当に現実的な

飛行前テストを行うことは非常に難しいため、設計プロセスは数値モデリングに大きく依存する必要があります。

衛星が軌道に乗ると、数値モデルはもう必要ないと考えがちですが、そうではありません。多くの場合、原因不明の部品が故障し、残りの電子機器を予期しない組み合わせで駆動する必要がある場合があります。衛星運用者は、運用寿命を延ばすことを目的として、このような状況での動作を予測するための熱モデルを依然として必要としています。

## 数値モデルの操作

数値モデルはすべて、熱伝達を記述する支配方程式の近似を解くことを伴います。それらは、非常に単純なモデルから、多くの幾何学のおよび物理的側面を含むほぼ完全に忠実なモデルまで多岐にわたります。最も単純な数値モデルは、衛星構造の幾何学的複雑さを軽減し、衛星の経時的な単一の温度を一括して計算するだけです。そこから、衛星のさまざまなサブシステムまたは部品全体に温度変動を導入することに取り組むことができます。これには、数値解析者が多くの近似、仮定、および個別の計算をモデルに導入する必要があります。

一方、完全忠実モデルは CAD 設計に直接基づいており、逆のアプローチを採用します。CAD 設計から直接開始することで、縮小モデ

ルに組み込まれる各単純化の面倒な手動の検証が不要になります。もちろん、CAD を直接使用すると、計算コストが増大します。CAD ベースの数値モデルは、衛星の形状を数千、さらには数百万の異なる計算要素に細分化するため、トレードオフが生じます。

歴史的に見て、集中モデリングアプローチには多くの効果がありました。かつてのコンピューターは比較的遅かったため、数値分析者が時間をかけて半手動で計算の複雑さを軽減することが、結果を迅速に得るために重要でした。このアプローチは、国際宇宙ステーションのような非常に大きな構造物のモデリングには依然として適切ですが、小型衛星の場合、特に計算コストが低下し続けているため、それとは反対のアプローチから始めることができます。ますます魅力的になってきています。

実際には、熱分析者は、完全に単純化されたモデルと完全な忠実度のモデルの間のスペクトル上のどこかで作業することを望むでしょう。たとえば、各ネジと締結具の CAD 記述を、接合された部品間の表面の集中熱抵抗に置き換えることが望ましい場合があります。同様に、チップや電池などの電子部品を、平均的な特性と内部散逸を備えた材料のブロックに縮小することは理にかなっているかもしれません。

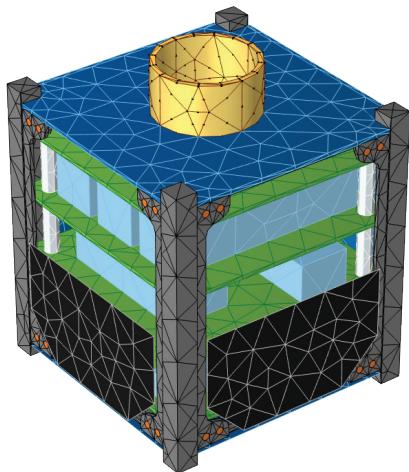


図2 インポートされたCAD ジオメトリと、一部のディフィーチャリングと単純化を行った結果の有限要素メッシュ。

### モデリングに関する重要な考慮事項

どのようなモデリング手法を採用するかに関係なく、特定の側面を考慮する必要があります。これらの点をさらに詳しく見てみましょう。

**衛星の幾何学的記述:** CAD 設計と各部品で使用されている材料の熱特性(熱伝導率, 密度, 比熱)によって, 衛星の総熱質量と部品間の伝導熱伝達が決まります。衛星面の相対的な向きによっても, ある面が別の面をどの程度よく認識できるかを表す形態係数が決まります。これは輻射熱伝達を計算するときに必要です。CAD 設計に加えて, ジオメトリに関連する追加情報もあります。たとえば, 2つの部品間の合わせ面には, 熱接触抵抗を変化させる薄いコーティングまたは結合材がある可能性があります。総抵抗は, 取り付け金具によって決定される接触圧力の関数になることもあります。

**すべての露出した表面の放射率:** 放射率(または吸収率)は, 表面が熱輻射をどの程度放出および吸収するかを示す尺度です。それは, 波長, 温度, および入射角の関数である可能性があります。形態係数と表面放射率の組み合わせを使用して, 輻射熱交換が計算されます。衛星の外表面と内部の両方に輻射線があります。外表面は, 太陽や地球からの熱輻射などの環境熱負荷も受けます。波長依存の放射率のトピックを理解することは特に価値があります。太陽は主な加熱源であり, 太陽電池を介した唯一の電気エネルギー源です。太陽からの光は短波長光として分類され, 強度のピークは波長 500 nm で, エネルギーのほとんどは 5 μm 未満の波長範囲にあります。衛星自体は太陽よりもはるかに低温で, はるかに長い波長, 主に 2 μm を超える波長で熱輻射を放射します。このため, 波長に大きく依存



図3 軌道上の衛星の可視化。太陽および地球に対する位置と方向, および衛星の露出面への照射を示しています。地球の画像クレジット: Visible Earth および NASA。

するサーマルコーティングを使用することが非常に一般的です。より短い波長での放射率が低いコーティングは太陽熱を低減しますが, 同じコーティングがより長い波長でより高い放射率を持っている場合, 熱をより効果的に輻射します。

**衛星軌道:** 標準のケプラー軌道要素によって定義される衛星軌道は, 衛星が地球の周りをどのように移動するか, またいつ食に入ったり, 食から抜け出したりするかを決定します。衛星が食になると, 太陽照射がなくなり, 通常, 外面の温度が大幅に低下します。熱モデリングの目的では, 特に地球低軌道にある小型衛星の場合, 軌道自体を周期的として扱うことができます。

**衛星の方向:** この情報により, どの面が太陽, 地球, または深宇宙を見ているかが決まります。衛星は, 特定の方向を向いたり, その軸を中心に回転したり, 衛星フレームに対して回転したり移動したりする構造の一部を備えている場合もあります。この情報は, 露出面への照射に影響します。軌道とは異なり, 方向は周期的ではない可能性があります。たとえば, 衛星アンテナは数軌道ごとにのみ地上局に向けられる場合があります。

**地球と太陽の輻射特性:** 太陽束は年間を通して変化し, この太陽束は衛星に直接入射するだけでなく, 地球から乱反射することもあります。アルベドとして知られるこの反射の大きさは, 惑星の表面上で変化する可能性が

あります。地球自体も赤外線放射体であり, この放射束は緯度と経度の関数になる可能性があります。太陽フラックスはよく知られていますが, アルベドと地球の赤外線放射も, 惑星の表面上および時間の経過とともに大きく変化します。

**部品の電気損失:** 太陽電池は入射光を電気エネルギーに変換し, その電気エネルギーは電子機器を駆動する電池の充電に使用されます。これらのさまざまな電子機器はすべて動作中に熱を放散し, これらの部品は継続的にオンになったり, 特定の所定の時間にオンになったり, 特定の条件に応じてオンになったりすることがあります。たとえば, ヒーターをサーモスタットで制御して, 部品を望ましい温度範囲内に保つことができます。

モデリング中にこれらすべての要素を考慮するには, COMSOL Multiphysics® などの効率的で信頼性の高いマルチフィジックスシミュレーションソフトウェアを使用する必要があります。

### COMSOL® での衛星モデリング

COMSOL Multiphysics のアドオンである伝熱モジュールには, 衛星モデリング用の専用ユーザーインターフェースである軌道熱負荷インターフェースが含まれています。ハイブリッド有限要素-ラジオシティ法に基づくこのインターフェースの機能により, エンジニアは CAD 中心のアプローチを使用して, 小型衛星

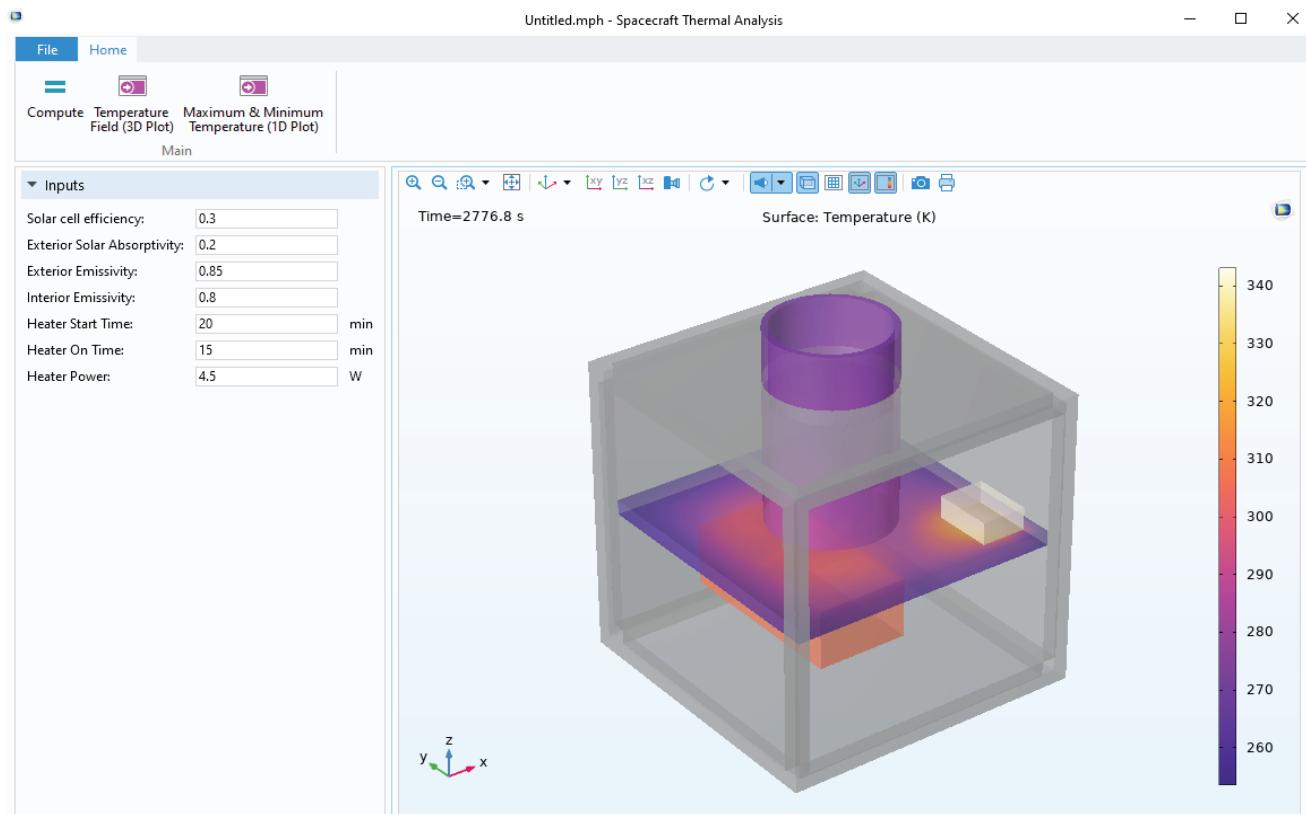


図4 立方体衛星の計算された温度変化を示すシミュレーションアプリケーション。

のほぼ完全な忠実度のモデルを構築できます。このインターフェースは COMSOL 製品にシームレスに統合されており、材料特性、荷重、境界条件を定義し、結果を抽出し、マルチフィジックスシミュレーションの物理カップリングを定義するための簡単な方法を提供します。伝熱モジュールには、流体、相変化材料、ヒーター、熱電効果のモデリングや、集中系のモデリングのための機能もあります。

軌道熱負荷インターフェースは、軌道と方位、太陽と惑星の特性を定義および検証する便利な方法を提供します。そこから、太陽（短波長）バンドと周囲（長波長）バンドの間でユーザーが選択可能な分割を備えた2バンド放射モデルを使用して、太陽、アルベド、地球の赤外線放射を計算します。これにより、異なる波長帯域で異なる放射率を指定できます。さらに、シングルバンドモデルは簡素化されたアプローチを提供します。さらに高いレベルの詳細が必要な場合は、マルチバンド放射モデルを使用することができます。

COMSOL® は、ベンダー中立の CAD 形式で読み取れることも、一般的な CAD パッケージと双方向でリンクすることもでき、CAD モデルへの変更は数値モデルで即座に更新されます。この CAD ジオメトリは、ディフィーチャリングツールを使用してクリーンアップした

り、ネイティブ機能を使用してメッシュ化を簡素化したりできます。あるいは、ソフトウェア内でジオメトリを作成することもできます。

### ≫ 結果の計算

これらの情報をすべて集めて熱数値モデルに入力すると、計算結果には時間の経過に伴う温度変化が表示されます。非常に単純化されたモデルの場合、これは単なるバルク温度である可能性があります。より忠実度の高いモデルの場合、すべての部品内の空間温度変化が計算されます（図4）。この情報は、衛星がすべての動作温度制限内に収まるかどうかを確認するために使用できます。そこから、分析者は、熱勾配によって発生する構造変形を計算して、そのような変形が望遠鏡の光学性能にどのような影響を与えるかを確認するなど、他の種類の解析に進みたい場合があります。この種の広範な数値モデリングにより、物理的テストの必要性が減り、衛星エンジニアは打ち上げ前に自信を持って設計を行うことができます。

太陽、アルベド、地球の赤外線放射は軌道間でほぼ周期的であると考えられるため、通常は複数の軌道にまたがる熱過渡計算の前に、1つの軌道にわたる総放射量を計算できます。この操作順序により、表面放射率のさまざまな組み合わせなどの仮定のシナリオを

テストすることが簡単になります。設計を反復する場合、大規模な単一コンピューターでバッチスイープ機能を使用したり、クラスターおよびクラウドコンピューティングリソースでクラスタースイープノード機能を使用したりできます。

設計の反復が完了し、衛星の準備が完了したら、配信時には、COMSOL 数値モデルをスタンドアロン アプリケーションとしてパッケージ化して衛星運用者に提供し、必要に応じて予期せぬ動作条件をテストできるようにします。

### ≫ 結論

衛星の熱管理は複雑な設計タスクであり、動作環境を物理テストで再現するのは困難です。たとえば、衛星が軌道を移動する際に発生する可能性のある温度変化や、搭載機器が発生する可能性のある熱など、シミュレーションを使用することでのみ予測できる変数があります。衛星熱解析専用の機能を備えた包括的なシミュレーションソフトウェアプラットフォームである COMSOL Multiphysics を使用すると、エンジニアは設計を迅速に繰り返し改善し、動作条件を検証し、数値モデルをシミュレーションアプリケーションとして同僚や顧客と共有できます。◎

Utrecht University, Netherlands

# 腐った貝殻が海のアルカリ性を保つのにどのように役立つか

ALAN PETRILLO 著

海洋生物によって生成される炭酸カルシウムは、海のアルカリ度を維持するのに役立ち、人為起源の二酸化炭素の自然な吸収源として機能します。重要だが不明瞭な深海の生物地球化学プロセスをより深く理解するために、Utrecht大学のOlivier Sulpis氏は、特定の貝殻が海底堆積物中の方解石粒子の保存にどのように役立つかを示す革新的な3D反応性輸送モデルを開発しました。



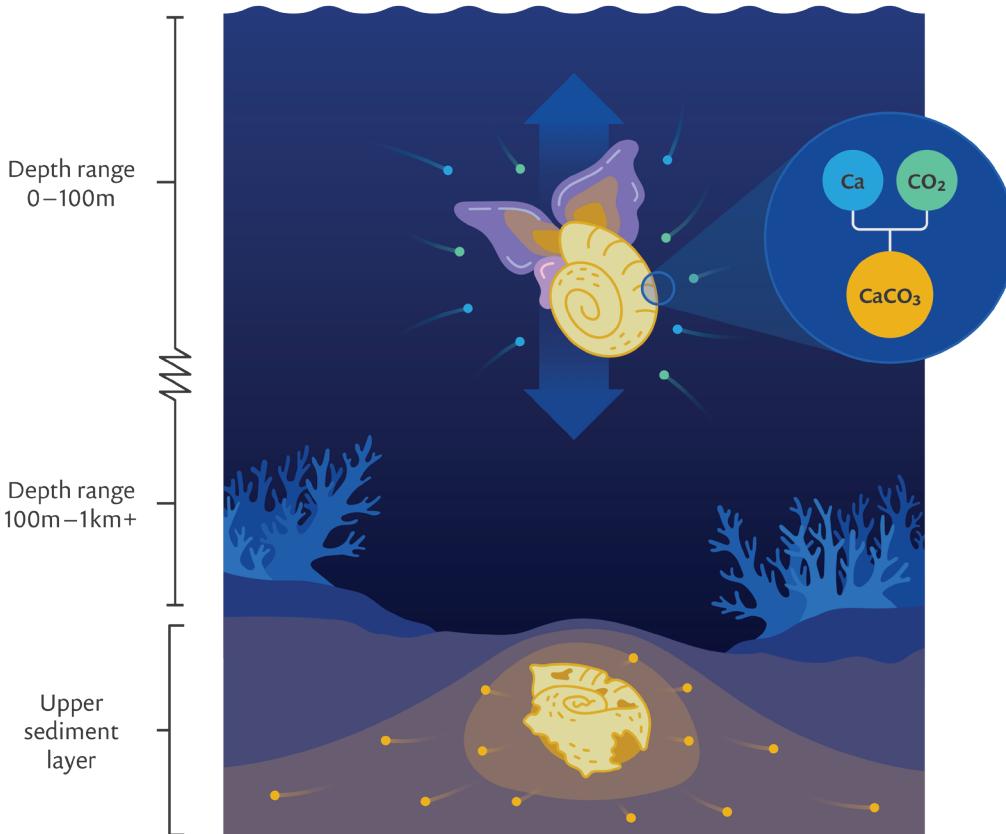
図1 海蝶の例。NOAAによる画像であり、米国では公知であり、Wikimedia Commons経由で提供されます。

生物とその環境との境界はどこにあるのでしょうか？通常、私たちの目はこの質問に答えることができるようです。私たちは木と土、鳥と空、貝殻と海を視覚的に区別できますが、見た目に騙されることがあります。私たちは生物と無生物の間に厳しい境界線を目にするかもしれませんが、より深く見てください。生物の一見堅実な端は、実際には多孔質の織りであり、どのタペストリーにも負けないほど美しく奥深いものです。

生物は環境と物質を交換することによってその存在そのものになり、このサイクルはそれらの環境も再形成します。私たちの目や心は分子レベルで何が起きているのかを認識するのに苦労するかもしれませんが、生命と環境の相互作用の影響は非常に大きく、おそらく海そのものと同じくらい大きいものになる可能性があります。

## » 小さいけれど存在感のある海蝶

たとえば、海蝶について考えてみましょう。オランダのUtrecht大学の地球化学研究者、



溶解性の高いアラゴナイトの殻が海底で方解石よりも早く溶解し、その過程でアルカリ性を放出して海水の  $\text{CaCO}_3$  飽和度を上げ、方解石を溶解から守っているということです。もし海洋酸性化によってアラゴナイト殻の生成が遅くなり、それによってアラゴナイト溶解の“亜鉛めっき”効果も鈍化したとすれば、方解石の溶解は海底での  $\text{CO}_2$  中和を実際以上に補わなければいけないこととなります。しかし、この説はもっともらしく思えるものの、海洋のアラゴナイトサイクルを研究することの難しさから、証明するのは困難です。

▶▶ アラゴナイトの循環に関する知識のギャップ

“発表された文献を見ると、アラゴナイトが海洋中の炭酸カルシウムの10%を占めているという推定もありますが、90%を占めているという研究もあります!”と、Sulpis氏は外洋のアラゴナイト循環についてほとんど知られていないことを説明します。

アラゴナイトの循環に関する人類の知識にはむらがありますが、その原因は、海洋深部での研究の難しさにあります。Sulpis氏は述べます、“この規模と深さで海水中の反応を観察することは、私たちが物理的に行くことのできない環境で起こるため、ほぼ不可能です。”“深海の堆積物から壊れやすい標本を物理的に取り除くことも困難です。堆積物トラップを使って海蝶の殻を回収するのは本当に難しいのです。”とSulpis氏は言います。“深海から持ち帰る頃には、すでに溶けてしまっている可能性が高いため、深海の圧力と温度における炭酸カルシウムの反応に関する良いデータが不足しているのです。”

海水中の炭酸カルシウムの挙動を数学的にモデル化することまではできません、”とSulpis氏は述べます。“殻が沈んで深海に到達することも確認できます。深海の堆積物からサンプルコアを回収すると、方解石はたくさんありますが、アラゴナイトは見当たりません。では、アラゴナイトはどこへ行くのでしょうか?”

▶▶ アラゴナイトの行方

方解石は海洋で見られる最も一般的な  $\text{CaCO}_3$  化合物ですが、Sulpis氏は、方解石とは異なる結晶構造を持ち、より可溶性であるアラゴナイトの方が、海洋炭酸塩サイクルにおけるその役割について、もっと考慮されるべきだと説明します。

“私たちはアラゴナイトについて多くを知っているわけではありませんが、海蝶が生息している浅い海域で、アラゴナイトがどの程度浸透しているかを推定することはできません、”とSulpis氏は述べます。“殻が沈んで深海に到達することも確認できます。深海の堆積物からサンプルコアを回収すると、方解石はたくさんありますが、アラゴナイトは見当たりません。では、アラゴナイトはどこへ行くのでしょうか?”

アラゴナイトが“ない”ことの説明として考えられるのは、より

図2 翼足類が死ぬと、その殻は海底に沈み、そこで  $\text{CaCO}_3$  の殻が分解されます。この分解は海洋のアルカリ度を維持するのに役立ち、時間の経過とともに炭酸塩が豊富な堆積物を蓄積します。

Olivier Sulpis氏は、“陸上で見るカタツムリの小型版に似ていますが、水中を飛び回れる翼が付いています、”と語ります。海蝶(翼足類とも呼ばれる)は体長1cm未満で、炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) の一種であるアラゴナイトから薄くて半透明の殻を作ります。方解石と呼ばれる別の形態の炭酸カルシウムは、サンゴによって形成される外骨格だけでなく、他の多くの貝殻も構成しています。

海蝶とその仲間の  $\text{CaCO}_3$  生成者は、海水に含まれる物質からアラゴナイトと方解石を合成します。“海水には、カルシウムと溶存炭素がいたるところに存在します、”とSulpis氏は言います。“このため、生物が結晶構造を構築するのに理想的な材料となります。”

▶▶ たとえ死んでも、 $\text{CaCO}_3$  生産者は海洋生物の維持に貢献します

他の炭酸塩を生成する生物と同様に、海蝶は環境に多大な影響を与えます。翼足類が死ぬと、アラゴナイトの殻が溶解して、海水中に浮遊する二酸化炭素(酸)の一部が中和されます。このようにして、世界の膨大な数の海蝶が海のアルカリ性の維持に貢献しています。しかし、海洋の二酸化炭素濃度の上昇は、そもそも海蝶が殻を作ることを可能にする条件を乱す可能性があります。それにより、アラゴナイト生産者の人口が減少し、酸性化が加速する悪循環に陥る可能性があります。

“私たちは海蝶について、彼らは非常に脆弱なため、海洋酸性化の‘初期対応者’です、”とSulpis氏は言います。残念ながら、特に彼らが死んで海の最深部に沈んだ後は、その多くが謎のままです。

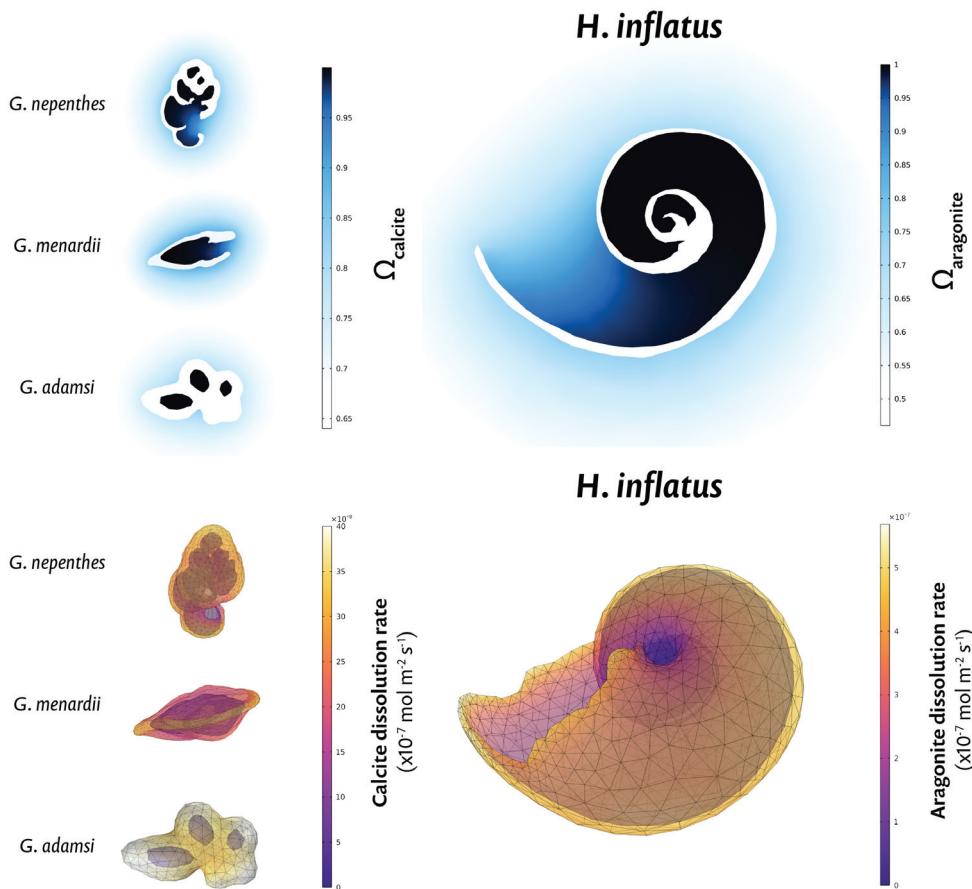


図3 4種の殻のシミュレーション。1分間水中に沈めた後の変化を示します。H. Inflatus 翼足類の殻はアラゴナイト製で、他は方解石製です。青色のモデルは周囲の海水中の  $\text{CaCO}_3$  飽和レベルを示し(上)、ヒートカメラのカラーテーブルのモデルは殻の溶解速度を示します(下)。

もうひとつの問題は、古いモデルが  $\text{CaCO}_3$  粒を滑らかで均一な物体として表現してきたことです。“これらの粒は、内側と外側がある複雑で不均質なマイクロメートルスケールの形をしています。” Sulpis 氏は、いくつかの単純化が必要であることは認めています。“可能な限り小さなスケールで、実際の形状をできるだけ忠実に再現したかったのです。”と言います。“いくつかの構造を単純化することを決定する前に、単純化しても結果が損なわれないことをシミュレーションで確認したかったのです。”

### 海洋と堆積物の境界ゾーンへのシミュレーションによるディープダイブ

方解石とアラゴナイトが海底でどのように相互作用するかをよ

り深く理解するために、Sulpis 氏は COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して新しい3Dモデルを開発しました。このモデルにより、海洋生物とその環境の境界の間を仮想的に移動することが可能になります。これにより、研究者は、アラゴナイトと方解石の粒子とそれらを取り囲む海水の間で起こる溶解反応をシミュレートできます。水のアルカリ度、密度、化学組成は、典型的な深海の条件に一致するように設定されました。チームはさまざまな固体をモデル化し、海水や海底堆積物との相互作用をシミュレーションしました。Sulpis 氏はまた、実際の標本のスキャンに基づいて、堆積物と水の境界面に貝殻のモデルを追加しました。たとえば、図3で強調表示されている H. inflatus の翼足類の殻は、ベネズ

エラ沖のカリアコ盆地で採取された標本の CT スキャンに基づいています。このような3D画像により、シェルの不規則な形状がその溶解にどのような影響を与えるかをシミュレーションで把握できるようになりました。

シミュレーションは、貝殻の内部形状が海水との反応に大きな影響を与えない可能性があることを示しています。“上の行を見ると、これらの殻の内側に閉じ込められた水が  $\text{CaCO}_3$  で完全に飽和する可能性があることがわかります。これにより、複雑な内面に沿ってさらなる溶解が起こらなくなり、貝殻は外側から内側へと溶けていきます。”と Sulpis 氏は言います。これらの結果は、少なくとも貝殻が完全に海水に囲まれている場合には、貝殻のモデル化された形状をある程度単純化しても、

必ずしもシミュレーション結果に影響を与えるわけではないことを示唆しています。

さて、方解石が豊富な堆積物に翼足動物の殻と海水を加えるとどうなるでしょうか? 図4は、この相互作用のシミュレーションによる影響を示しています。溶解する海蝶の殻は、堆積物に混合された方解石粒子の溶解を防ぐことが示されています。これらの粒子は球としてレンダリングされました。これは、図3のようなシミュレーションの結果に基づいて Sulpis 氏が行った単純化です。

堆積物と水の界面近くで固体と混ざり合う海水は、このプロセスにおいて重要な役割を果たします。海底と水との境界は変化しており、見かけの境界線より下でも海水は固体の周りを循環しています。海水と堆積物の間の段階的な境界を捉えることは、Sulpis 氏の3Dモデルの利点の1つです。翼足類の殻が溶解すると、周囲の海水はアラゴナイトで飽和します。堆積物と混合した飽和海水のこのゾーンは、図4bの赤い陰影で示されています。他の生物が残した方解石と化学的に相互作用し、保護するのは、このアラゴナイトが飽和した海水です。

図4aは、方解石に関する海水の飽和状態を示しています。これは、海と堆積物間のこの遷移領域全体にわたって方解石が溶解する能力を示しています。海底から 1.5 mm 上では、海水は飽和度が低く、方解石粒子はすぐに溶解します。黒い線は、アラゴナイト源が存在しない場合、方解石の溶解が堆積物と水の界面で継続することを示しています。赤い線は、翼足類の殻の溶解が過飽和を引き起こすため、懸濁した方解石粒子の溶解を阻止する領域を示しています。

### 他の人類が海を修復するのを助ける

水中のマイクロメートルスケールの生化学的プロセスを分析する新しい手段を開発した Sulpis 氏は、現在、この研究がさらなる研究の指針になることを模索しています。“次のステップは、ビーカーに入れた方解石と翼足類の殻を使って、これらのプロセスを

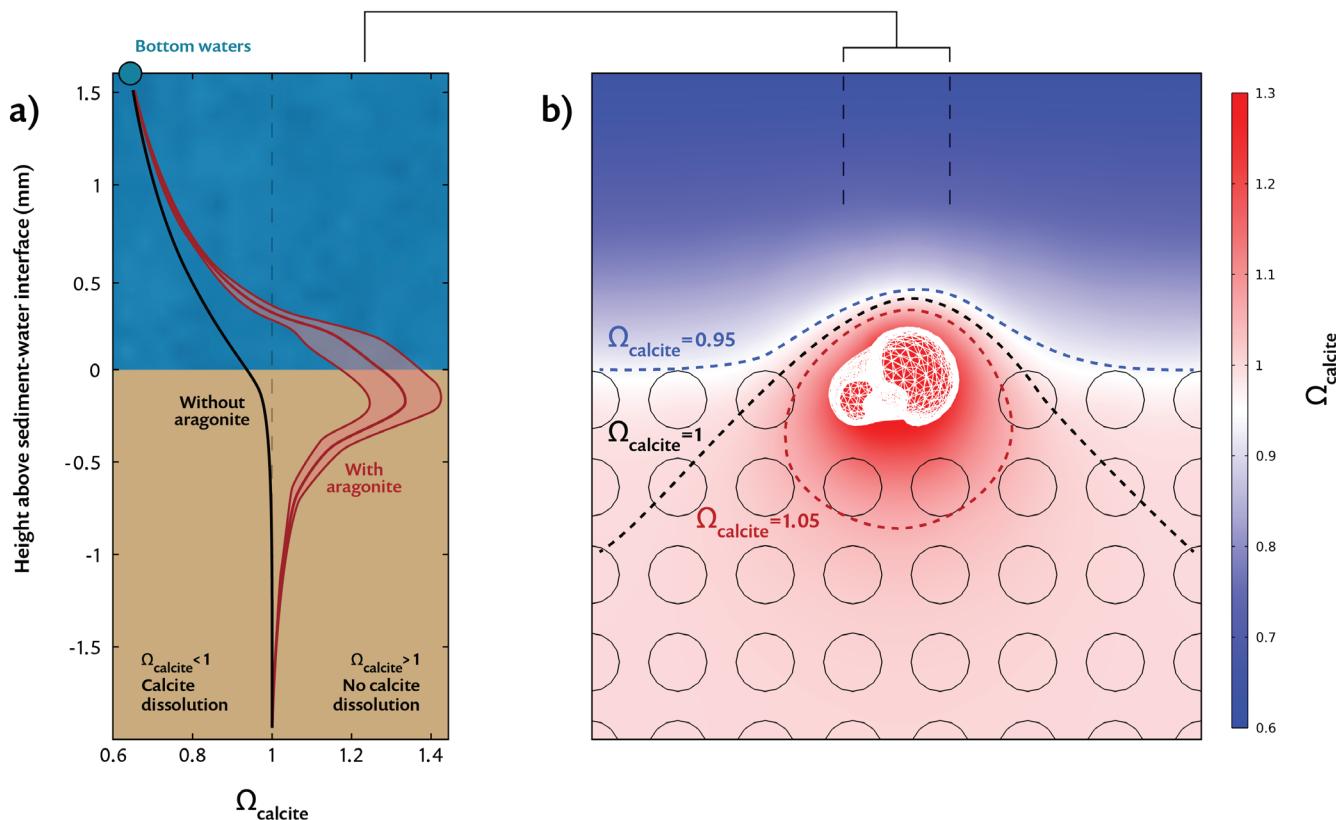


図4 堆積物と水の界面の上, 界面, 下における方解石の溶解傾向 (a). 溶解した翼足類の殻は, 堆積物と水の境界面の周囲の境界領域に影響を与えます (b).

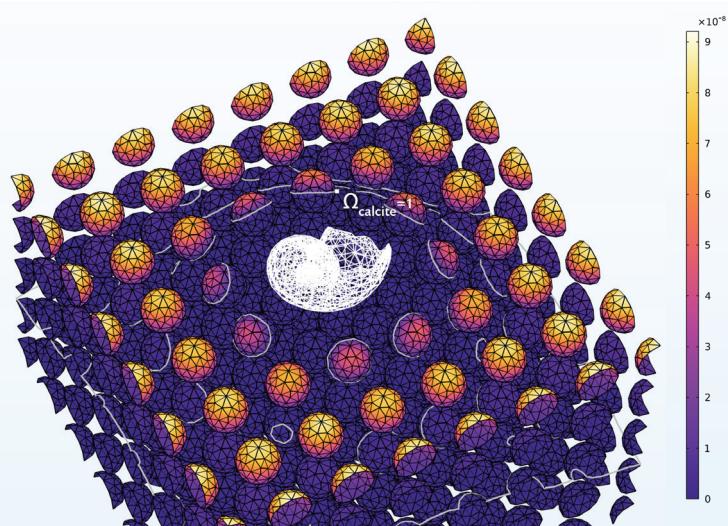


図5 海底堆積物中の翼足類の存在が近くの方解石粒子の溶解速度にどのような影響を与えるかを示すシミュレーション結果。明るい色の領域は, 溶解がより急速に起こっている場所を示します。白い線は, 方解石が溶解副生成物と平衡状態にある飽和線または等高線を示します。これは, 正味の溶解または沈殿が存在しないことを意味します。

実験室で再現してみる事です。今のところ, 実験結果はシミュレーションの結果とよく似ています,”と彼は言います。“今の目標は, この情報を使って, その場で観察できることをよりよく解釈することです。”この目的のために, Sulpis 氏たちはオランダ研究評議会 (NOW) から助成金を得て, アラゴナイト生産者がどのように環境を形成するかを直接研究しています。

もちろん, その活動が環境に最も大きな影響を与える生物は人間です。人為的酸性化は, 海洋生物が地球の各所に織りなす生命維持のタペストリーを脅かしています。これを念頭に置くと, 炭酸ガス循環を理解するというより広範なプロジェクトの緊急性が増します。“私たちが海洋に加えている二酸化炭素の量と比較すると, 中和されているのはごくわずかです,”と Sulpis 氏と言います。“おそらく炭酸サイクルプロセスがその仕事を行うことができるでしょうが, そうなるまでには数千年かかるかもしれません!”

より直接的な視点に立つて, Sulpis 氏は, 同胞が自分の研究と分析を海蝶の世界, そして私たちの世界を守るために応用してくれることを熱望しています。“私たちのモデルはすべてオープンアクセスです。私たちが作成したものを他の人が利用できることを願っています,”と彼は言います。◎

Zeugin Bauberatungen, Switzerland

# オープンプランオフィスにおけるサウンドとスタイルの調和

オープンプランのオフィスでは、職場での会話や電話は一般に気を散らすものです。スイスのコンサルタント会社、Zeugin Bauberatungen は、職場の音響条件を改善するために、オフィスビル設計を通じて音がどのように伝播するかをモデル化し、適切な適合性を見つけるために特定の設計変更を分析しています。

ALAN PETRILLO 著

音響エンジニアは作曲家のように、音が人間の耳に与える影響を形成する手助けをすることができます。日常生活を取り巻く音は交響曲のように感動的ではありませんが、部屋の音響は中にいる人々に大きな影響を与えます。現代のオフィスの多くはオープンプラン設計で、ワークスペース間の物理的な隔たりは最小限に抑えられています。すべてのオープンオフィスの会話を無音にすることは不可能であり、またその必要もありませんが、職場の音響条件に気を配ることで、他の人の会話が気にならなくなることはあります。

スイスのコンサルタント会社 Zeugin Bauberatungen 社は、出勤日のサウンドスケープの構成を微調整するために、COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して、提案されたルームデザインを通して音がどのように伝播するかを予測しています。Zeugin 社の音響効果の精密なモデルにより、チームは耳にも目にも心地よい実用的な改善策を提案することができます。

“大きな吸音壁は、空間を視覚的に乱雑にし、インテリアデザインのコンセプトと矛盾する可能性があります。”と Zeugin 社の創始者でマネージングディレクターの Thomas Zeugin 氏は言います。“私たちの

**“私たちのシミュレーションは、従業員の音響的な作業環境を改善するとともに、建築家のビジョンと調和する最適化方法を提案するのに役立ちます。”**

— THOMAS ZEUGIN, Zeugin 創設者兼マネージングディレクター

シミュレーションは、建築家のビジョンと調和し、従業員の音響的な職場環境を改善する最適化方法を提案するのに役立ちます。”

## » シミュレーションに基づいた設計で、話し声が気にならなくなる

熟考されたインテリアデザインの決定により、部屋の音質を大幅に改善することができます。職場の音響を最適化する場合、音質を向上させるということは、実は話し声を聞き取りにくくすることでもあります。くぐもったざわめきは、クリアで歯切れの良い会話よりも気が散りにくいものです。

理解しやすい人間の話し声の音波は、特定の周波数を占めています。Zeugin 社は建築音響学のケーススタディを作成し、会話中の声の基本周波数は通常 100 Hz から 250 Hz の間であると説明しています。例えば、子音には 250 Hz から 8 kHz の周波数帯域があります。これらの帯域の音波を変化させることで、音声を聞き取りにくくすることができます。

図2の表は、音声の明瞭度に関連する3つの指標と、全体的な音響条件の良し悪しに対応する範囲（左から右へ）を示しています。Zeugin 社のチームは、COMSOL® ソフトウェアを使用して可能な室内設計のモデルを構築し、これらの指標やその他の関連指標の値を予測することができます。

## » 音道と断熱値の計算

聴覚効果を調整するという彼の専門的な役割を考慮すると、Thomas Zeugin 氏が訓練された音楽家でもあることは驚くべきことではありません。“私はベルンのスイスジャズスクールでギターの音楽

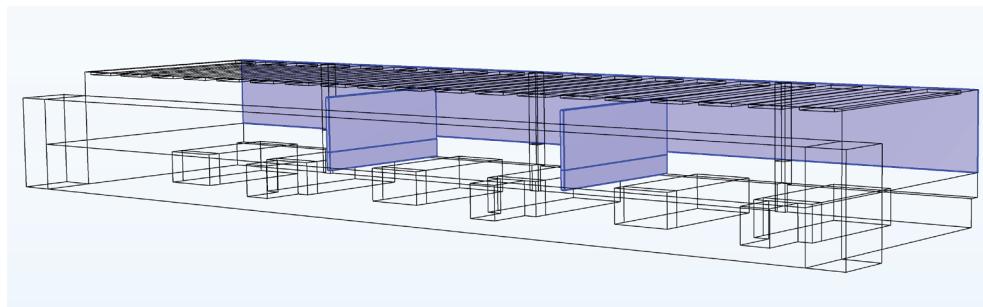
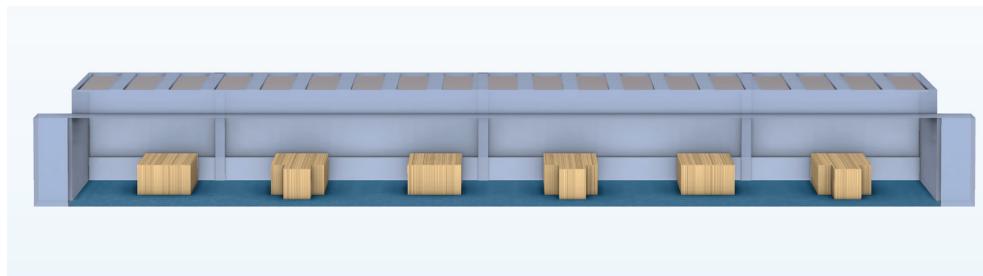


図1 COMSOL Multiphysics® ソフトウェアを使用して Zeugin Bauberatungen 社がモデル化したオープンオフィスの設計。モデル化された空間には一連のワークステーションが含まれています (上部の黄褐色で表示)。吊り天井と後ろの壁全体に窓がある大きなカーペット敷きの部屋で、吸音パネルとカーテン (下に表示) は騒音レベルを低減し、音響的な作業条件を改善します。

学位を取得し、その後、父と一緒にエンジニアリングコンサルタント会社を設立しました。”と彼は説明します。“音楽教育を受けたため、私は当初から部屋や建物の音響と音響の最適化に強い関心を持っていました。”

もちろん、Zeugin 氏の分析は、彼のよく調整された聴覚以上のものに基づいています。“最初のステップは、アイリングの残響時間方程式に基づいて、調査対象の部屋の大まかな統計計算です。インテリアデザインのより詳細な建築計画を受け取った後、COMSOLで3Dモデルを構築できます。”と彼は言います。

“部屋のモデルを取得したら、音線音響を使用して計算を実行して、重要な室内音響メトリクスを取得できます。また、アドオン音響モジュールの音響拡散方程式インターフェースも使用します。”と Zeugin 氏は続けます。“これにより、二次音経路の伝達と部屋を仕切る部品の遮音値を計算します。その後、これらの要因がモデル化された空間全体の音響条件にどのような影響を与えるかをシミュレーションできます。”

	Poor Acoustic Conditions	Moderate Acoustic Conditions	Good Acoustic Conditions
Deflection Distance $r_D$	$r_D > 10$ m	$10 \geq r_D > 5$ m	$r_D \leq 5$ m
Spatial Decay Rate $D_{2,S}$	$D_{2,S} < 5$ dB	$5 \text{ dB} \leq D_{2,S} < 7$ dB	$D_{2,S} \geq 7$ dB
A-Weighted Sound Pressure Level of Speech at 4 m $L_{P,A,S,4m}$	$L_{P,A,S,4m} > 50$ dB(A)	$50 \geq L_{P,A,S,4m} > 48$ dB(A)	$L_{P,A,S,4m} \leq 48$ dB(A)

» 音響緩和策の効果を比較

前述したケーススタディは、Zeugin 社がシミュレーションを使用して実世界的设计問題に対処していることを示す有益な例です。スイスの Ostermundigen 市にあるオフィスビルを対象としたこのプロジェクトでは、広いオープンルームでの音の伝搬を解析しました。空間の初期設計 (図3) には、複数の共有作業テーブル、広い壁面の窓、二重構造の床、音響パネルを吊り下げたコンクリート天井が採用されていました。その他の素材や家具はまだ選定されていませんでした。

“私たちのシミュレーションでは、騒音軽減策が講じられなければ、会話によって発生する低周波音波が妨げられずに部屋中に広がる可能性があることが示されています。”と Zeugin 氏は述べます。“シミュレーションから偏向距離の値を導き出すことができ、気が散るレベルの音声が音源から12メートルも離れたところまで広がる可能性があることがわかりました。”これらやその他の指標によ

図2 左側の列に列挙されている3つの指標に従って、音響性能の悪い、中程度、および良好な範囲を示す表。出典: EN ISO 3382-3:2012.

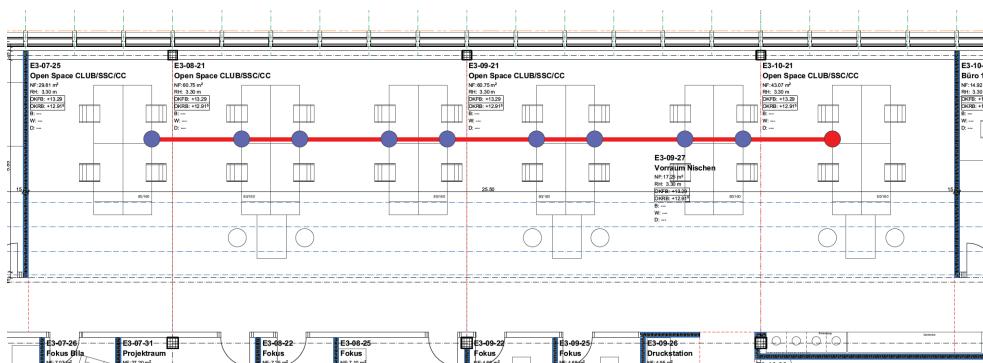


図3 Zeugin 社によってモデル化されたオフィス設計の俯瞰図。赤い点は模擬音波の発生源を示し、青い点は測定点を示します。

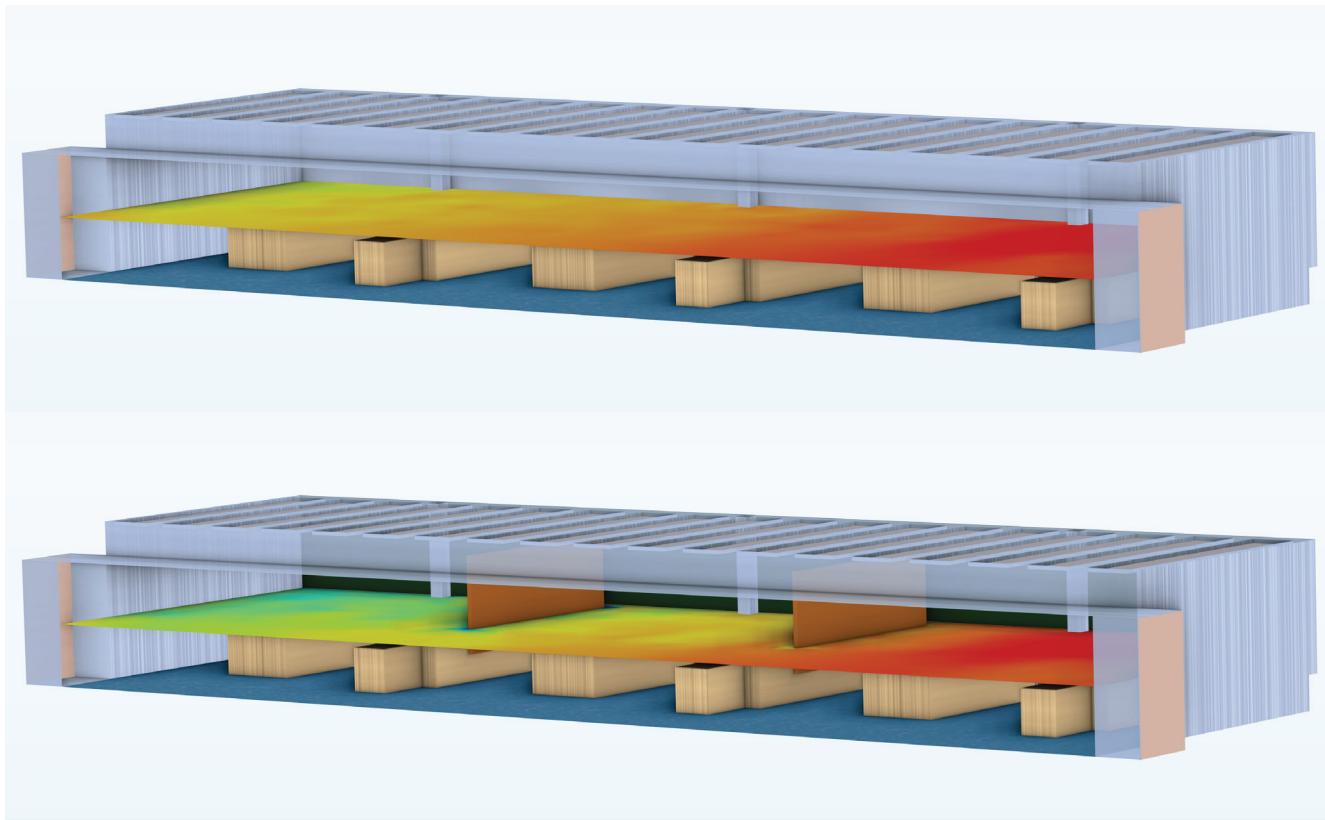


図4 緩和策が存在しないオフィスにおける 1000 Hz の音波の体積分布 (上) と、吊り下げられたパネルと吸音カーテンが設置されている場合の 1000 Hz の音波の分布 (下) を示す Zeugin 社のモデルの画像。

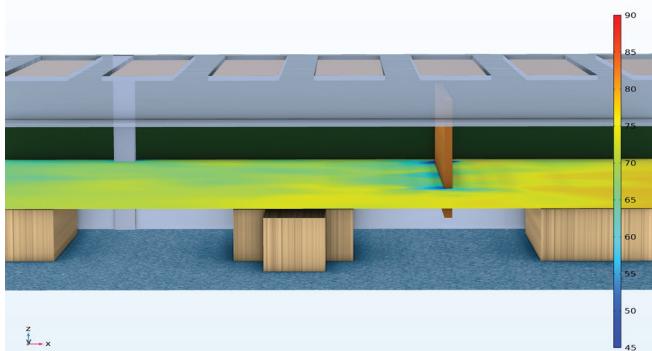


図5 左端の吊り下げられたパネルの拡大図と、それが体積分布に与える影響。

り、図2で定義されているように、この部屋の音響特性が劣悪から中程度のカテゴリに決定的に配置されます。

幸いなことに、建築要素を戦略的に配置することで、このパフォーマンスを向上させることができます。図 4は、2つの具体的な設計変更の影響を示しています。1つは窓への吸音カーテンの設置、もう1つは部屋の中央付近に鋼板を挿入した2枚の吊り下げ発泡パネルの配置です。カーテンは部屋全体を Zeugin 社の“中程度の”範囲に導き、吊り下げパネルは“良好な”音響作業条件が包含する領域を大幅に拡大します。Zeugin 氏は、“吸収性の素材は役に立ちますが、音波の経路

を直接遮断する高い位置に障壁を設置することが最大の利点であると考えています。”と述べます。

彼が言う有益なバリアとは、個々の机を囲む小部屋の壁ではなく、部屋の中央付近にある大きなパネルのことです。このような仕切りは視覚的にはプライバシーを確保できますが、音響的には“ワークステーション間の壁は2~3 dB しか騒音レベルを下げません。”と Zeugin 氏は言います。音に関する一般的な誤解を打ち消すためにデータに基づいた分析を提供することで、シミュレーションは Zeugin 社のクライアントにより音響効果の高いインテリアデザインへと導くことができます。

#### » シミュレーションで屋内外のサウンドスケープを構成する

作曲家の作品がどのような規模の聴衆にも響くように、Zeugin

社チームの音響解析の価値は、個々のオフィスワーカーの耳をはるかに超えて広がっています。例えば、チームは現在、ある企業の食堂や会議室の再設計に取り組んでいます。食堂や会議室では、室内だけでなく部屋間の音響にも高い要求があります。他のプロジェクトでは、さらに大規模な騒音軽減が求められています。ベルン市では、交通量の多い幹線道路に隣接する地区全体の音響改善を手がけました。

“COMSOL ソフトウェアの機能と柔軟性のおかげで、さまざまなタイプのプロジェクトに対してモデルを構築し、比較可能な計算を実行できます。”と Zeugin 氏は述べています。“追跡測定に基づいて、シミュレーション結果が実際の状況とほぼ一致していることがわかりました。これにより、私たちは調査結果に自信を持ち、お客様にも安心していただくことができます。”◎

COMSOL, Sweden

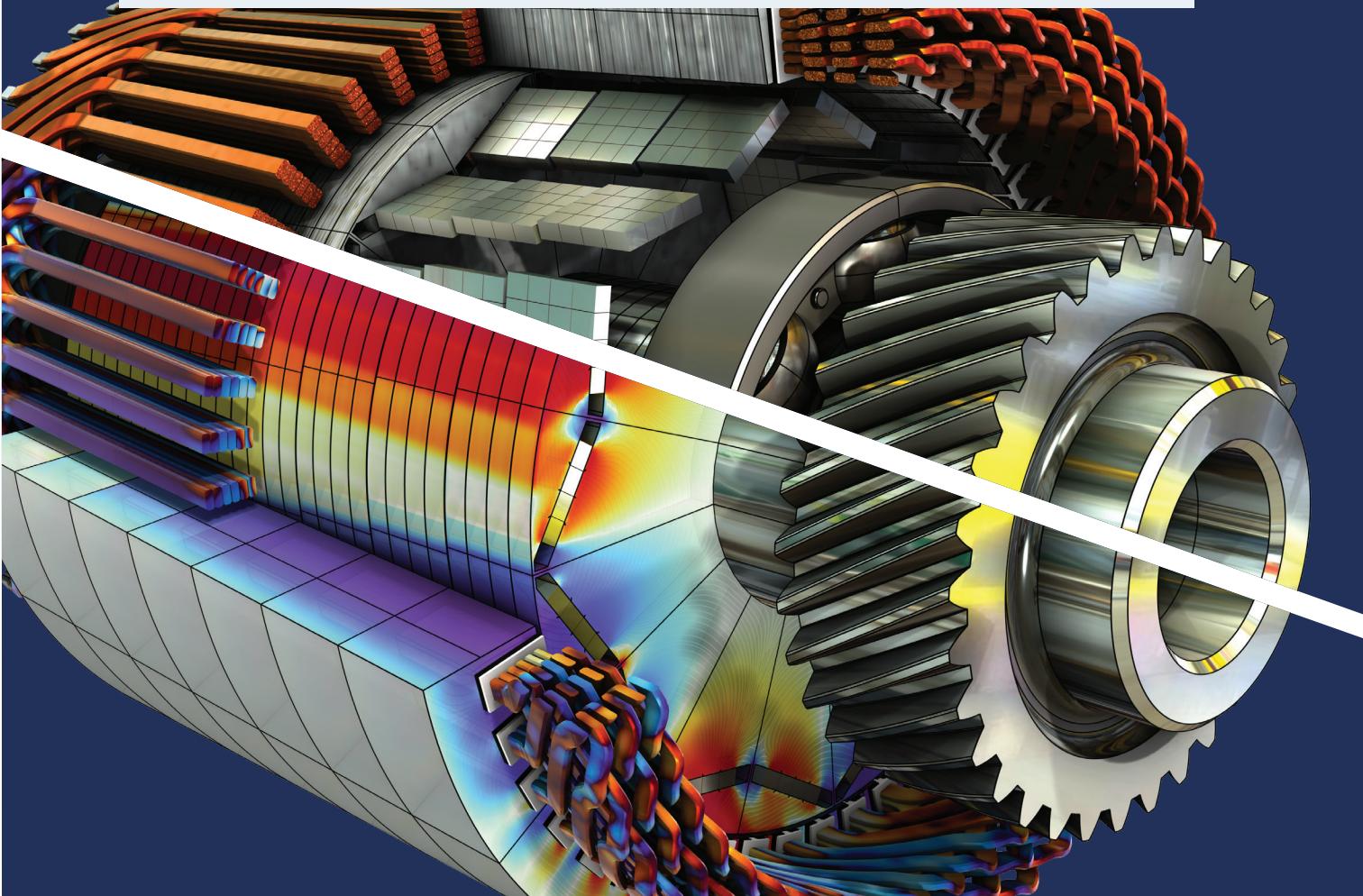
## 3Dへの移行

# モーターモデリングが車両の電動化に向けて準備を整える

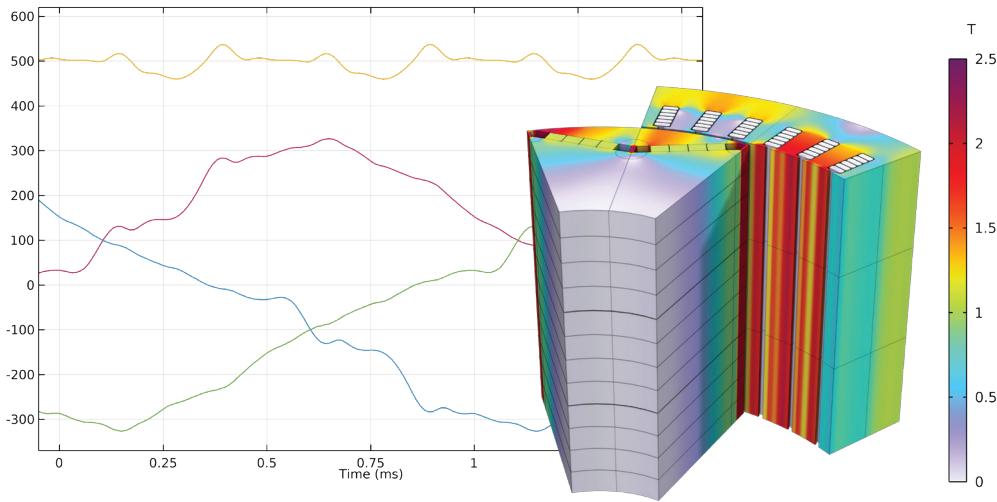
DURK DE VRIES 著

電気モーターと駆動システムはほぼ200年前から存在しており、電気自動車も同様です。現在、さまざまな市場をターゲットにしたさまざまなモーター設計が利用可能です。モーターには、安価になるように開発されたもの、効率的になるように開発されたもの、強力になるように開発されたものがあります。しかし、3つの基準すべてを1つの設計に組み合わせようとするこれほど強い動機はかつてありませんでした。クリーンエネルギーソリューションの模索により緊迫感が高まっています。新世代の電気自動車が台頭しており、業界と政府の関係者双方によって電気ドライブトレインの開発に何十億ドルも注ぎ込まれているため、高度な数値解析が強く求められています。

さらに、単一の勝利デザインはありません。王座を主張できるモーターのタイプは少なくとも数種類あり、それらの要件は、たとえば商品の輸送、公共交通、モータースポーツなど、特定の用途に応じて異なります。限界をさらに押し上げるために、Koenigsegg Automotive AB が最近“軸磁束”モーターを使用したように、いくつかの企業は異なるタイプのモーターを組み合わせています。最後に、航空宇宙産業と海洋産業も電気ソリューションを推進しています。全体的に見て、最適なモーター設計を実現するには検討すべきオプションが膨大にあり、その成功には3Dモーターモデリングが最も重要です。

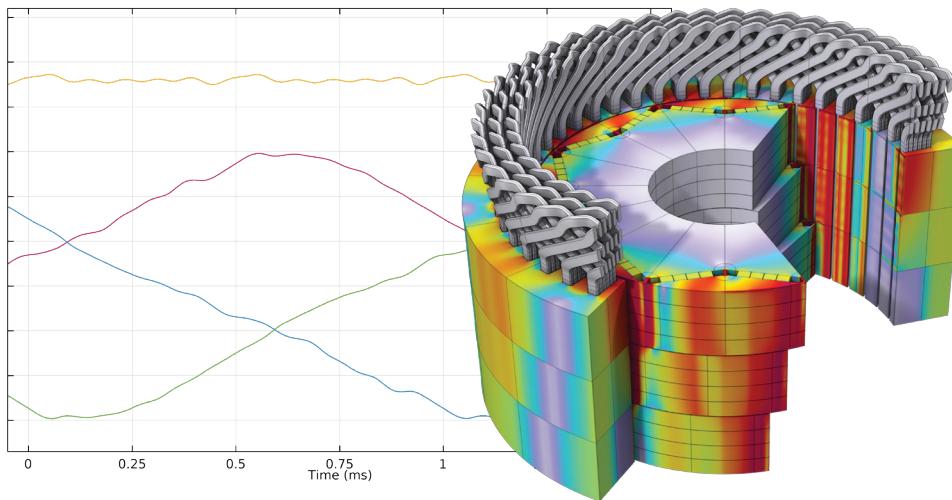


## 3Dモーター設計の比較



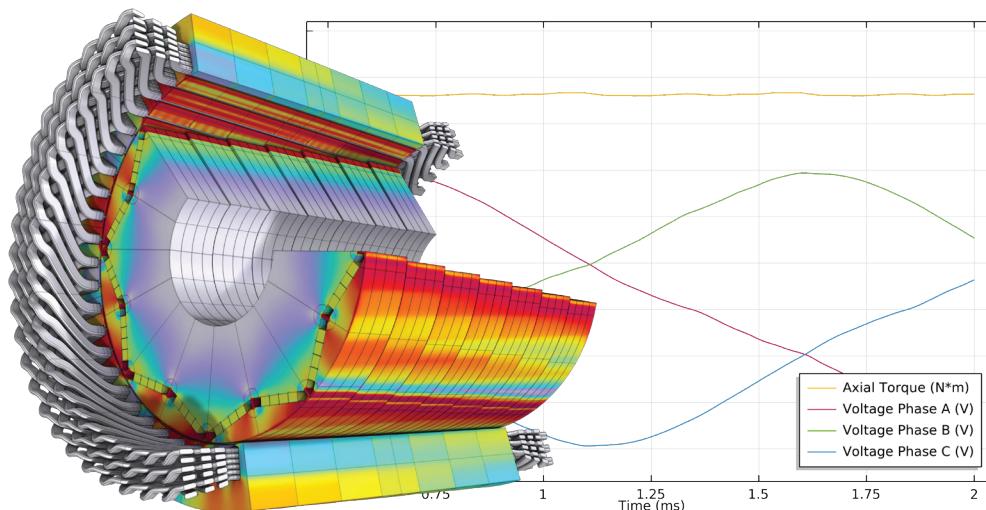
### 抽出された2D

比較的シンプルな3Dモデル. 最小限のハードウェア要件. 2Dモデルと非常に近い一致. 3Dモデリングの基本を調査検証するのに役立ちます.



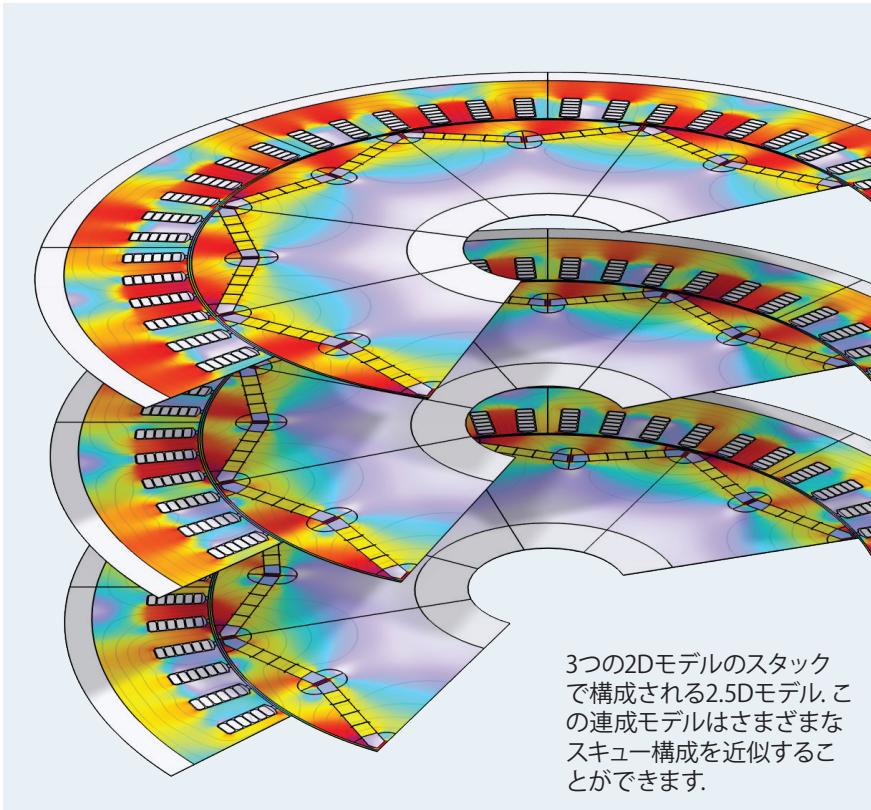
### 対称3D

軸の中心で対称であると仮定します. (前と後ろは順番に求解されます.) 中程度のハードウェア要件. 最終効果といくつかのスキュー構成を調査するための効果的な方法です.



### 完全3D

セクター対称のみを想定します. ハードウェア要件は中程度から高程度. 複雑なスキュー設計 (ローターとステーターのスキューの組み合わせ) や, 対称性が崩れる可能性のある完全に連成したマルチフィジックス現象に適しています. 2Dモデルを校正するための幅広い構成をサポートします.



3つの2Dモデルのスタックで構成される2.5Dモデル。この連成モデルはさまざまなスキュー構成を近似することができます。

## 2Dモーターモデルのキャリブレーション

2Dおよび2.5Dモーターモデルは一度テストして適切に調整すると、特にトポロジ最適化やパラメトリックスイープのコンテキスト内で非常に役立ちます。多くの3D効果は2Dモデルで再現または近似することができます。これはラジアル磁束機で可能で、軸磁束機でもある程度可能です。

しかし2Dモデルには多くの盲点があります。従来は、非常にコストのかかるプロトタイプの開発サイクルを使って校正と検証を行わなければなりません。老舗メーカーは通常長年かけて収集したデータに頼ってきました。長年にわたって収集されたデータに依存し、慣れ親しんだ設計に固執してきたのです。現在、ハードウェアとソフトウェア開発の最近の進歩により、3Dモーターモデルはそのギャップを埋めることができ、大幅なコスト削減と製品開発の迅速化が可能になりました。

重要な前段階は、3Dモデルへの信頼を深めることです。これは2D解が正確であることが分かっている単純なケース、例えば単純な押し出しに過ぎない3Dモデルを見て行うことができます。このような構成を使用して、3Dメッシュとソルバーの設定を調整し、解法速度と精度の妥協点を見つけることができます。測定値との比較もオプションです。

この時点から、3Dモデルはスキューの有無、エンドターンの有無、磁石分割カットの有無など、さまざまな形態をとることができ、これらの形態を比較することで特定の効果を切り分けることができます。次のステップは、それらが2Dでどの程度再現できるか、また再現できない場合3D結果、ひいては測定結果をよりよく再現するために、2Dモデルを補強するために使用できる基礎的なロジックがあるかどうかを判断することです。

その際、3Dモデルは重要なポイントをマッピングするのに非常に役に立ちます。どの材料が使用されるのか、どの熱条件が適用されるのかが正確にわからなくても、どの入力パラメーターが機械の性能に強く影響し、どれが無視できるのか、あるいはコストを節約するために使用できるのかを調べることができます。

最後に、電気モーターはマルチフィジックスマシンであることを念頭に置くことが重要です。したがって、最適な設計には、機械的性能、音響的性能、熱的性能も考慮する必要があります。

## 2D対3Dモーターモデリング

歴史的には、わずかな計算量で十分な精度が得られる2Dモーターモデリングが主流でした。しかし近年、3D現象を完全に求解す

る要求が高まっています。強化されたモーターモデリングソフトウェアとますます強力になるハードウェアとともに、この要求は全く新しい市場を切り開きます。

完全忠実な3Dモデリングは、そうでなければ確実に定量化することが難しい多くの効果について、貴重な洞察を与えてくれます。これらの中には、2Dで再現できるもの、近似できるもの、補正できるものがあります。我々はCOMSOL Multiphysics®ソフトウェアを使用して、以下のような多くの効果を調査しました：

- フリンジ効果
- ローターのスキュー、ステーターのスキュー、または溝の適用によるトルクリップルの低減
- ステップスキューローターセグメント間の磁束漏れ
- 磁石内の渦電流とそれを抑制するための磁石分割カットの効果
- 抵抗効果、誘導効果、ターン終了時の損失
- ターン内およびターン間の皮膚および近接効果
- 電場の特異性により電磁破壊のリスクが増大

さらに、熱伝導、構造力学、音響学、流体力学など、考慮すべきマルチフィジックス効果がいくつもあります。

3Dモーターモデリングへの移行は避けられないように思えますが、それだけで解決策になると考えるべきではありません。実際には、2Dモデリング、3Dモデリング、プロトタイプングを組み合わせた開発戦略が最適です。トポロジ最適化研究のような計算負荷の高い研究は、通常、3Dに戻る前に、かなり微調整された2Dモデルを使って行われます。3Dモデルは、2Dモデルとプロトタイプ間のミッシングリンクの役割を果たします。3Dモデルによって設計者はマシンをより深く理解ことができ、測定値をより適切に解釈し、2Dモデルを校正することができます。

## 3Dモーターモデリングリソース

COMSOL Multiphysicsのモーターモデリング機能は近年拡張され、その結果、性能と操作性が向上し、モデル例も改善されました。3Dモーターモデリングに関する詳細なリソースを無料でご覧いただけます：

[www.comsol.com/model/110261](http://www.comsol.com/model/110261) ©

# COMSOL ラーニングセンター

[comsol.com/support/learning-center](https://comsol.com/support/learning-center)

ラーニングセンターはオンデマンドのモデリングとシミュレーションの学習教材を集めたものです。すべてのリソースは無料で、すべてのスキルレベルのユーザーがアクセスできます。コンテンツは、記事、チュートリアルビデオ、モデルファイル、モデリング演習、ステップバイステップの説明という形で、体系的な学習体験を提供します。

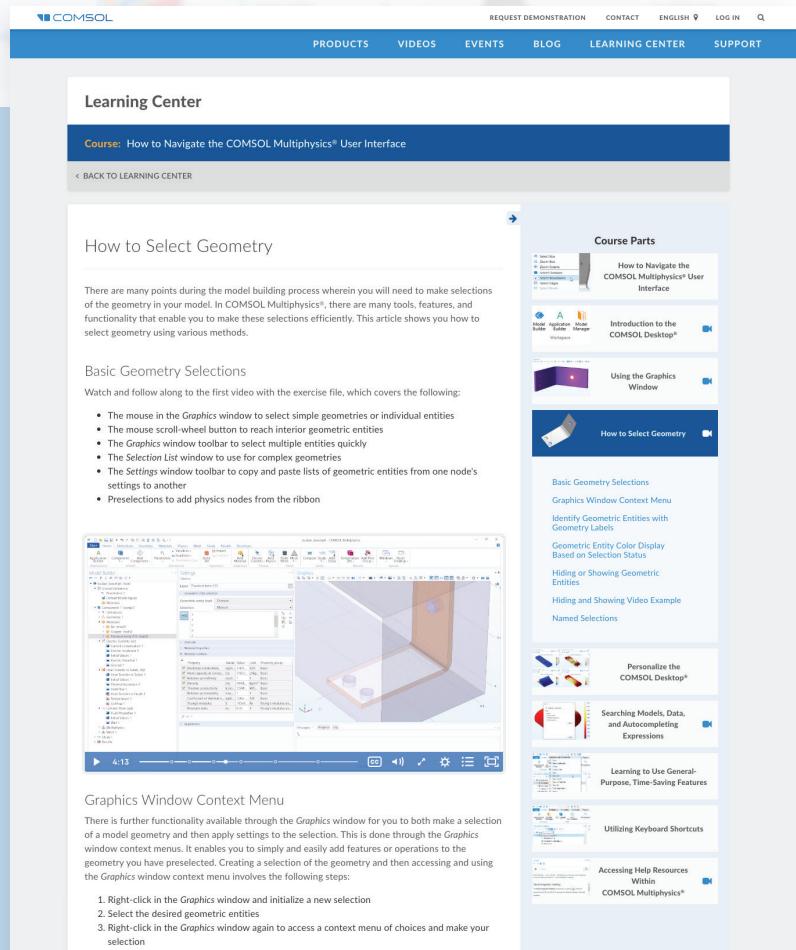
トピック分野にわたるマルチパートおよびスタンドアロンのリソースにアクセスできます：

- 電磁気学
- 構力力学
- 音響
- 流体流れ
- 熱伝達
- 化学工学
- モデリングワークフロー
- インターフェース
- 方程式ベースのモデリング
- 最適化
- シミュレーションアプリ

## 推奨リソース

## COMSOL Multiphysics® を始めるにあたって

このマルチパートリソースは COMSOL® ソフトウェアの使い方の基本をカバーしています。ステップバイステップの例題と、より自由度の高い例題の両方を収録しています。モデリングワークフロー、効率的なモデリングとシミュレーションのテクニック、モデルに基づいてシミュレーションアプリケーションを構築する方法に精通してください。



The screenshot displays the COMSOL Learning Center interface. At the top, there is a navigation bar with links for PRODUCTS, VIDEOS, EVENTS, BLOG, LEARNING CENTER, and SUPPORT. The main content area is titled "Learning Center" and features a course titled "How to Navigate the COMSOL Multiphysics® User Interface". Below this, a specific article titled "How to Select Geometry" is highlighted. The article text explains that there are many points during the model building process where selections are needed, and it provides a list of methods for selecting geometry. A video player is embedded in the article, showing a 3D model of a cube with a selection tool being used. To the right of the article, there is a "Course Parts" sidebar listing various topics such as "Introduction to the COMSOL Desktop", "Using the Graphics Window", and "How to Select Geometry".